



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

FLISR MOODULI SEADISTUSPÕHIMÕTTED ELEKTRIVÕRGU JUHTIMISSÜSTEEMIS

FLISR MODULE CONFIGURATION PRINCIPLES IN THE POWER GRID CONTROL SYSTEM

RAKENDUSKÕRGHARIDUSTÖÖ

Üliõpilane:	Jaanika Abel
Üliõpilaskood:	178360EDTR
Juhendaja:	Helle Hallik, vanemlektor
Konsultant:	Marko Kiisk, Enefit Connect OÜ peaspetsialist

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

30.05.2021

Autor: / Allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab rakenduskõrgharidustööle esitatud nõuetele

30.05.2021

Juhendaja: / Allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Jaanika Abel (sünnikuupäev: 03.11.1989)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „FLISR mooduli seadistuspõhimõtted elektrivõrgu juhtimissüsteemis“,

mille juhendaja on Helle Hallik,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/allkirjastatud digitaalselt/

30.05.2021

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jaanika Abel, 178360EDTR
Õppekava, peeriala: EDTR17/17 – Telemaatika ja arukad süsteemid
Juhendaja(d): Helle Hallik, vanemlektor, +372 620 4808
Konsultant: Marko Kiisk, Enefit Connect OÜ, Võrgu tehnoloogia üksuse
peaspetsialist, +372 5817 1277, Marko.Kiisk@enefit.ee

Lõputöö teema:

FLISR mooduli seadistuspõhimõtted elektrivõrgu juhtimissüsteemis
FLISR module configuration principles in the power grid control system

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hetkel toimiva elektrivõrgu juhtimissüsteemi ja selle puuduste analüüsimine.
2. FLISR mooduli kasutamise võimaluste väljaselgitamine Elektrilevi elektrivõrgu juhtimissüsteemis.
3. Parendussoovituste tegemine ettevõttele Elektrilevi OÜ, et rakendada isetaastuva võrgu lahendust.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Valdkondliku kirjanduse läbitöötamine	25.10.20
2.	Metoodika väljatöötamine empiirilise osa läbiviimiseks	19.03.21
3.	Katsete analüüsimine lähtuvalt uurimisülesannetest	09.05.21

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 31. mai 2021. a

Üliõpilane: Jaanika Abel /allkirjastatud digitaalselt/ ".....".....202....a

Juhendaja: Helle Hallik /allkirjastatud digitaalselt/ ".....".....202....a

Konsultant: Marko Kiisk /allkirjastatud digitaalselt/ ".....".....202....a

Programmijuht: Helle Hallik /allkirjastatud digitaalselt/ ".....".....202....a

AVALDUS

Soovin kinnist kaitsmist oma 2021. aasta kevadel kaitstavale lõputööle pealkirjaga „FLISR mooduli seadistuspõhimõtted elektrivõrgu juhtimissüsteemis“. Lisaks palun töö mitteavaldamist viieks aastaks. Avaldus on kooskõlastatud Elektrilevi OÜ infoturbejuht Indrek Künnapuuga. Avalduse põhjuseks on lõputöös sisalduv ettevõtte Elektrilevi OÜ konfidentsiaalne info.
Lugupidamisega
Jaanika Abel

SISUKORD

Eessõna	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1. SISSEJUHATUS	8
2. ELEKTRIVÕRGU TOIMIMINE JA JUHTIMINE.....	10
2.1 Põhivõrk ja jaotusvõrk Eestis	10
2.2 Jaotusvõrgu juhtimine.....	11
2.3 SCADA juhtimissüsteem.....	14
2.4 SAIDI indeks	16
2.5 Tarkvõrk	17
2.6 Isetaastuv võrk.....	18
2.6.1 Isetaastuva võrgu lahendus Hollandi 20 kV jaotusvõrgus.....	23
2.6.2 FLISR moodul Soome jaotusvõrgus	24
2.6.3 Uuring FLISR mooduli simulatsioonist ja testimisest.....	26
3. FLISR MOODULI SEADISTUSPÕHIMÕTTED	28
3.1 Uurimuse eesmärk	28
3.2 Vajalik tarkvara	28
3.2.1 Mooduli profiilid SCADA juhtsüsteemis	28
3.2.2 Kasutatavad FLISR mooduli etapid	29
3.2.3 Tingimused mooduli käivitamiseks.....	29
3.2.4 Rikke tuvastamise meetodid	30
3.3 Metoodika.....	31
3.4 Sündmuste valim	32
3.5 Uurimuse tulemused	33
3.6 Tulemuste analüüs	34
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY	37
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39
LISAD	41

Eessõna

Lõputöö teema leidmiseks konsulteeris autor kolleegidega Elektrilevi ettevõttest ja valik tehti lähtuvalt uurimisprobleemi aktuaalsusest, vajalikkusest ettevõttele ja autori huvist. Autor tänab ettevõttepoolset konsultanti Marko Kiiske, infoturbejuhti Indrek Künnapuud ja teisi töökaaslasi ettevõtetest Elektrilevi ja Enefit Connect, kes andsid töö valmimise jooksul kasulikke nõuandeid. Autor soovib tänada igakülgse abi eest juhendaja Helle Hallikut.

Lõputöö käigus rakendati FLISR moodulit Saare juhtimispiirkonnas rikkeliste katkestuste lahendamisel keskpingevõrgus. Töö tulemusena esitati uurimuse tulemused, nende analüüs ja parendussoovitused mooduli efektiivsemaks kasutamiseks SCADA-3 süsteemis.

Märksõnad: SCADA, tarkvõrk, rikete haldus, FLISR, rakenduskõrgharidustöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

ADMS – SCADA-3 süsteemi keskkond (ingl k *Advanced Distribution Management System*)

DMS – jaotusvõrgu operatiivjuhtimise tugisüsteem (ingl k *Distribution Management System*)

FLISR / FLIR – rikke asukoha määramise, rikke isoleerimise ja toite taastamise moodul (ingl k *Fault Location, Isolation and Supply Restoration*)

KOL – koormuslüliti

KP – keskpinge

LP – lahutuspunkt

M – mast, nt M21 = mast 21

MP – madalpinge

PAJ – piirkonnaalajaam

RTU – kaugjuhitav terminaliseade (ingl k *Remote Terminal Unit*)

SAIDI – katkestuse keskmine kestus tarbimiskoha kohta aastas (ingl k *System Average Interruption Duration Index*)

SCADA – keskne kontroll- ja juhtimissüsteem (ingl k *Supervisory Control and Data Acquisition*)

TLA – taaslülitusautomaat

VL – võimsuslüliti

1. SISSEJUHATUS

Ettevõtte Elektrilevi OÜ, mis katab elektrivõrguga 93% Eestist, alustas 2020. aastal üleminekut olemasolevalt võrgu juhtimissüsteemilt uuele tipptasemel SCADA-3 süsteemile. Kuna SCADA-3 süsteem toetab tarkvõrgu arengut ja võimaldab juhtida võrku reaajas, toob see kaasa uusi võimalusi ja mooduleid elektrivõrgu veelgi paremaks juhtimiseks [1].

Nii kliendid kui ka jaotusvõrgu ettevõtte ise peavad oluliseks töökindlat ja kvaliteetset elektrivõrku. Võrguteenuse kvaliteedi üheks näitajaks on SAIDI indeks, mis näitab katkestuse keskmist kestust tarbimiskoha kohta aastas [2]. Eesti energiamajanduse arengukava näeb ette, et 2030. aastaks saavutatakse SAIDI indeksit puudutav eesmärk: „jaotusvõrgus katkestuste keskmine kogukestus minutites tarbimiskoha kohta aastas ei ületa 90 minutit, mis saavutatakse ilma täiendava koormuseta tarbijatariifile [3].“

Kõige rohkem mõjutavad SAIDI indeksit keskpingevõrgus toimuvad rikkeline katkestused. Käesolev töö keskendub rikete haldamise moodulile FLISR, mis tõhustab dispetšerite tööd keskpingevõrgus katkestuste lahendamisel. Rikke ilmumisel jaotusvõrgus tuvastavad kaitseseadmed rikkekoha ja annavad dispetšerile soovitusi, milliste lülitite asendeid muuta, nii et kliendid, kes asuvad rikkest puutumata liinilõigu toitel, saaksid vähem kui ühe minutiga toite tagasi. FLISR mooduli rakendamine elektrivõrgu juhtimissüsteemis lühendab paljudele tarbijatele elektrikatkestuse kestust. Seetõttu väheneb võrguteenuse kvaliteeti iseloomustav näitaja SAIDI. [4]

Käesoleva töö uurimusliku osa eesmärk on selgitada välja FLISR mooduli kasutamise võimalused Elektrilevi elektrivõrgu juhtimissüsteemis. Lisaks tehakse ettevõttele parendussoovitusi, et rakendada isetaastuva võrgu lahendust.

Praktilises osas püstitatakse järgnevad uurimisülesanded:

- Selgitada välja, kas Saare piirkonna keskpingevõrgus on piisaval määral kaugjuhitavaid seadmeid.
- Katsetada, kas FLISR moodul suudab rikkeid lahendada kiiremini kui manuaalselt juhtides, ilma valelülimesteta.

Lõputöö esimeses peatükis kirjeldatakse põhivõrku ja jaotusvõrku Eestis, jaotusvõrgu juhtimist, SCADA juhtimissüsteemi, SAIDI indeksit, tarkvõrku ja isetaastuva võrgu moodulit FLISR. Nimetatud mooduli rakendamisest tuuakse kolm näidet varasemalt

läbiviidud uuringutest: 1) Hollandi 20 kV jaotusvõrgu pilootprojektist, 2) Soome jaotusvõrgu uuringust ning 3) simulatsiooni- ja testimise uuringust.

Teises peatükis antakse ülevaade autori poolt läbiviidud uurimusest, milles vaadeldi nelja Saare juhtimispiirkonnas toimunud rikkelist katkestust keskpingevõrgus. Vaadeldud rikkelisi fiidreid matkiti SCADA-3 testkeskkonnas ja analüüsiti neid lähtuvalt püstitatud eesmärkidest. Vastavalt läbiviidud katsete tulemustele tehti parendusettepanekud ettevõttele Elektrilevi OÜ.

Lõputöö sisaldab ka viit Lisa, millest 2-5 kirjeldavad detailselt autori poolt läbiviidud katseid.

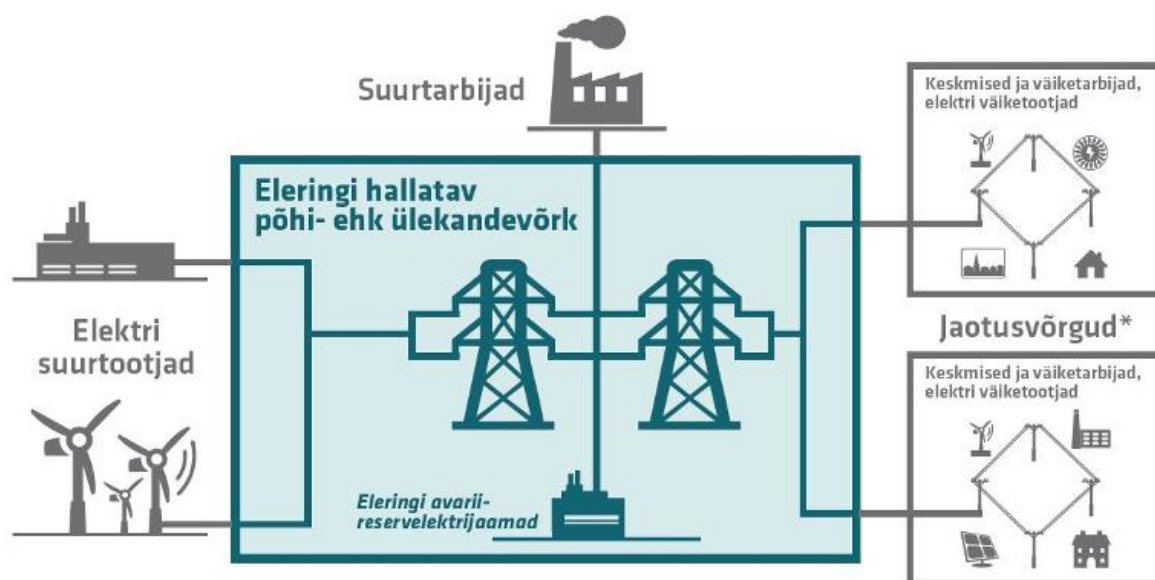
2. ELEKTRIVÕRGU TOIMIMINE JA JUHTIMINE

Antud peatükis tutvustatakse elektrivõrku Eestis: nii põhivõrku Eleringi näitel kui ka jaotusvõrku Elektrilevi näitel. Kirjeldatakse tänast võrgu juhtimist ning ühtlasi antakse ülevaade tuleviku tarkvõrgust ja SCADA-3 süsteemist. Tutvustatakse võrguteenuse kvaliteeti iseloomustavat varustuskindluse näitajat SAIDI ja isetaastuva võrgu FLISR moodulit. Tuuakse erinevate riikide näiteid antud mooduli rakendamisest.

2.1 Põhivõrk ja jaotusvõrk Eestis

Elektrivõrku saab kujutada kahe osana: põhivõrk ja jaotusvõrk. Põhivõrk transpordib elektrienergiat tootjatest tarbijate lähedale, jaotusvõrgu ülesandeks on jaotada põhivõrgust saadud elektrienergia vahetult tarbijatele. [5]

Eestis tegutseb põhivõrguettevõtjana Elering AS, kes on ühtlasi süsteemihaldur. Jaotusvõrguettevõtjaid oli 2019. aastal 33. Neist suurim on Elektrilevi OÜ, kellele järgnevad VKG Elektrivõrgud OÜ ja Imatra Elekter AS. [6] Joonisel 2.1 kujutatakse elektrivõrku Eestis, kuhu kuuluvad nii põhivõrk kui ka jaotusvõrgud.

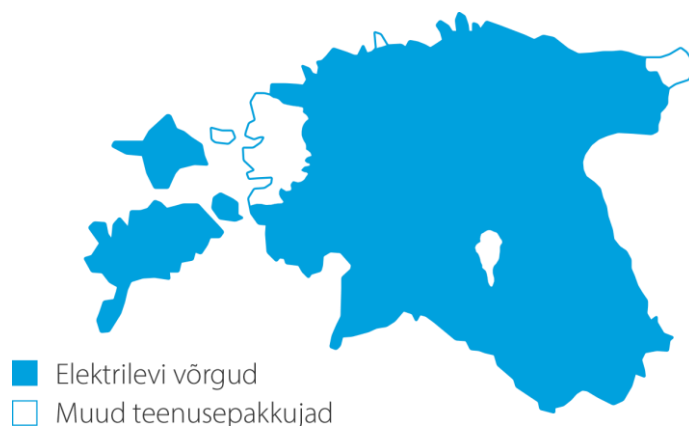


**Eestis tegutseb üle 30 jaotusvõrgu, kellest suuremad on Elektrilevi, Imatra Elekter ja VKG Elektrivõrgud.*

Joonis 2.1 Eesti elektrivõrgu kujutamine [7]

Põhivõrgu selgroo moodustavad võimsad suurte elektrikoguste ülekandmiseks mõeldud 330 kV õhuliinid. Kõige rohkem leidub 110 kV õhuliine, mille kaudu jõuab elekter erinevatesse piirkondadesse. Põhivõrk sisaldab ka üht 220 kV õhuliini, mitmeid maakaabelliine (peamiselt Tallinnas) ja merekaableid, muuhulgas ka Eesti ja Soome vahelisi alalisvooluühenduste EstLinkide merekaableid. Elektri põhivõrgus on ligi 5500 kilomeetrit kõrgepingeliine ja 150 alajaama. [8] Eleringi ülesandeks süsteemihaldurina on bilansihaldus, et oleks tagatud tarbimise ja tootmise tasakaal, ning tagada võrgu töökindlus ja ohutu toimimine [6].

Elektrilevi OÜ katab elektrivõrguga 93% Eestist, neil on üle 504 000 elektrivõrguteenuse kliendi. Üle terve Eesti hooldab ja uuendab Elektrilevi 60 000 kilomeetrit elektriliine ja 24 000 alajaama. Suuremad alad, kus jaotusvõrguteenust pakuvad teised ettevõtted, on Läänemaa, Viimsi ja Narva koos selle ümbrusega (joonis 2.2). [9]

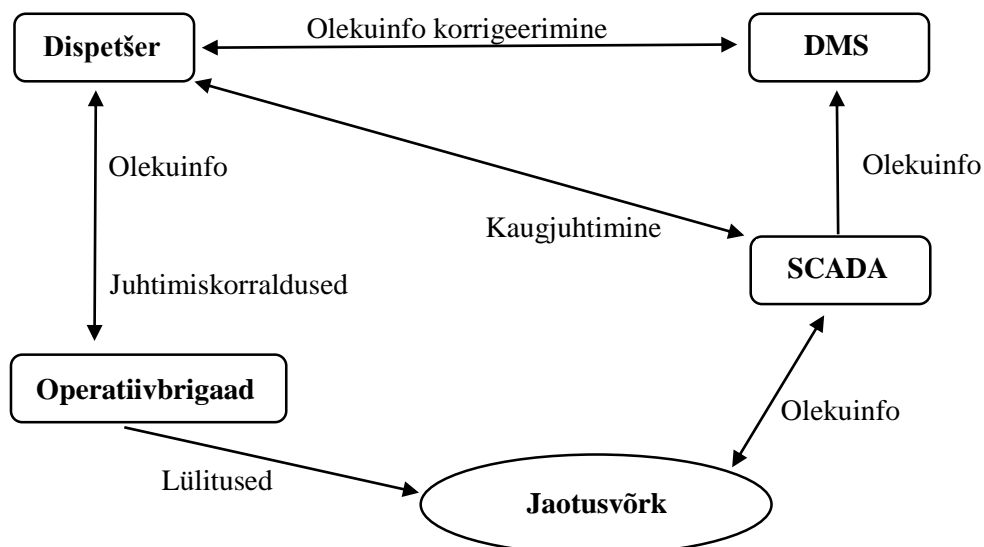


Joonis 2.2 Jaotusvõrgu piirkonnad Eestis: Elektrilevi vs muud teenusepakkujad [9]

2.2 Jaotusvõrgu juhtimine

Jaotusvõrgu juhtimise põhivahendiks on dispetšisüsteem SCADA, mis kogub andmeid võrgu talitluse kohta ning võimaldab seadmete kaugjuhtimist (SCADA süsteemi tutvustakse põhjalikumalt järgmises alapeatükis). Lisavahendina kasutatakse jaotusvõrgu talitluse tugisüsteemi DMS, mis toetab elektri jaotusvõrgu põhilisi juhtimistegevusi: talitluse jälgimine ja juhtimine, rikete käsitlemine, koormuse jälgimine ja juhtimine, tarbijate teenindamine, operatiivbrigaadide juhtimine. [10]

Jaotusvõrgu talitluse jälgimine seisneb võrgu skeemi (topoloogia) ja lülituste kindlaksmääramises ja monitooringus. Oluline osa on võrgu seisundi ehk võimsuste jagunemise arvutustel, koormuste prognoosimisel ja optimeerimisarvutustel. Dispetšerid kasutavad võrgumudelit, mis koosneb staatilistest ja dünaamilistest andmetest. Staatilised andmed (nt liini tüüp ja asukoht, trafode ja lülitite andmed jms) saadakse võrguinfosüsteemist ja dünaamilised andmed (pinge, võimsus, lülitite asendid) dispetšisüsteemist. Jaotusvõrgus on paljud lülitid käsitsi juhitud ja jälgitavad, seega nende asendid on määratud operatiivbrigaadidelt või lepingupartneritelt saadud info järgi (joonis 2.3). Võrgu skeem on ekraanil kuvatud tavapäraselt geograafilisel taustal, kus väljalülitatud liiniosad on näidatud valgena ja suletud kontuurid jämeda värvilise joonega. Selle järgi kontrollivad dispetšerid skeeme ja teevad vajadusel korrekture. [10]



Joonis 2.3 Jaotusvõrgu operatiivjuhtimise info ja korralduste liikumise skeem [10]

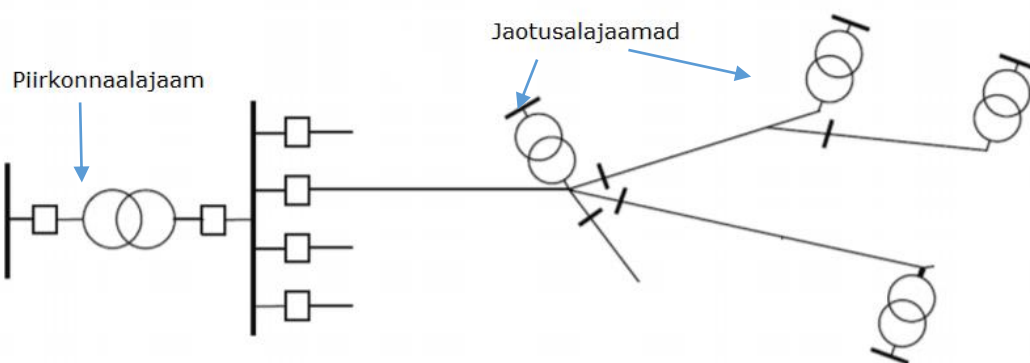
Liinidele on paigaldatud käsitsi lülitatavad lahutuspunktid jaotusvõrgu juhtimiseks, mida saavad ümber lülitada operatiivbrigaadid. Operatiivbrigaadi objektile sõitmine võib võtta palju aega. Kui hooldustööde ja remondiga seonduvalt ei põhjusta see probleeme, siis rikete puhul pikendab see oluliselt elektrikatkestuste kestust. Seetõttu on varustuskindluse suurendamiseks muudetud jaotusvõrgus osa lülituspunkte kaugjuhitavateks. Elektrilevi jaotusvõrku on paigutatud mastivõimsuslülitid ennekõike suurema rikketõenäosusega liinide (nt metsas asuvad õhuliinid) ette. Lahk- ja koormuslülitid on paigutatud nii, et dispetšer saaks paremini rikkekohta eristada. [10]

Rikete käsitlemisel on esmatähtis välja selgitada vea asukoht ja iseloom ning seejärel taastada tarbijatele toide. Faaside vahelisele lühisele reageerib relekaitse, mis kogu fiidri ehk toiteliini välja lülitab (võimsuslülitid piirkonnaalajaamas avaneb).

Operatiivpersonali ülesanne on võimalikult kiiresti lokaliseerida rikkekoht, see lahkülitite abil eraldada ning rikkest puutumata osa fiidrist taas sisse lülitada. Ühe fiidri ulatuses on lahkülititeid kümneid ning seega saab enamikule tarbijatest toite taastada. Toite taastamisel saab vajadusel kasutada reservühendusi naaberfiidritega, lisaks kontrollitakse ka tehniliste piirangute täitmist nagu ülekoormus ja pingekadu. Siiski väiksele osale tarbijatest kestab elektrikatkestus kuni avariiremondini. Rikkekoha lokaliseerimise aega saab vähendada mastivõimsuslülitite ja koormuslülitite abil. Rikkekoha leidmiseks tuleb leida lühise elektriline kaugus (kaugus PAJ võimsuslülitist rikkeni), mille aluseks on lühisvoolu arvutused. Efektive vahendina rikkekoha kiireks ja täpseks määramiseks keskpinge õhuliinidel kasutatakse rikkeindikaatorit, mis toimib nii lühise kui maaühenduse korral. [10]

Jaotusvõrgu keerukama skeemi korral muutub rikkelise skeemiharu määramine keerulisemaks ülesandeks. Sel juhul tulevad kasuks lisaandmed ja operatiivpersonali kogemused. Rakendatakse ka ekspertsüsteemi, mis võtab arvesse dispetšerilt saadud info ja rikke kauguse arvutuslikud tulemused ning väljastab oletusliku rikke asukoha. Järgneb keerukas rikkekoha isoleerimine ja fiidri taas sisse lülitamise tegevus, mis tuleb dispetšeritel lahendada lühikese aja jooksul, et vähendada tarbijatele voolukatkestuse kestust ja sellest tulenevat kahju. [10]

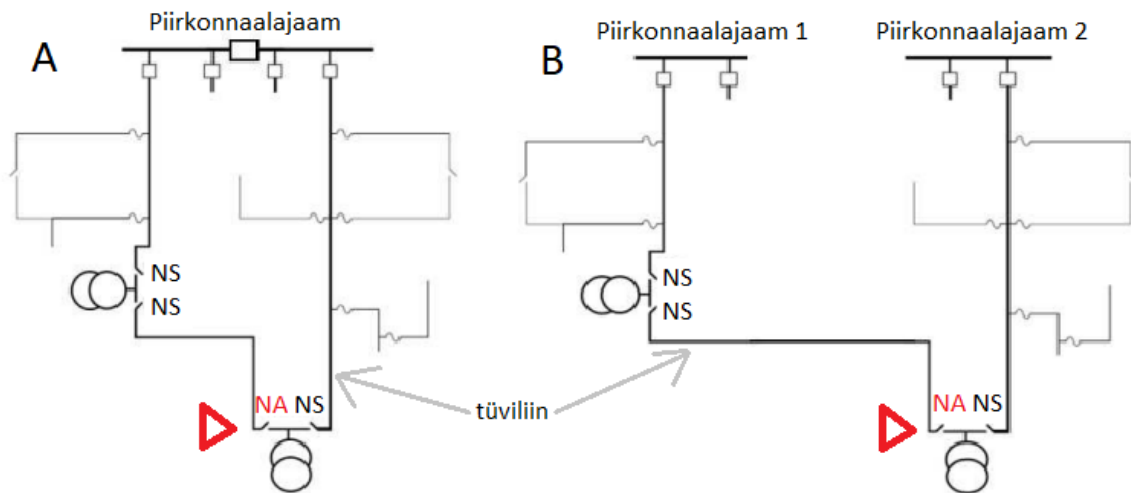
Tarbijatele toite taastamisel saab määravaks tagavaratoite võimalus keskpingevõrgus. Lihtsaimaks ja enim levinud jaotusvõrgu tüübiks on radiaalvõrk (joonis 2.4), mis tähistab ainult ühte vooluteekonda alajaama ja kliendi vahel. Kuna radiaalvõrk tagab ühepoolse toite, jääb rikke korral kogu toiteliin pingetuks. [11]



Joonis 2.4 Keskpingevõrgule iseloomulik radiaalfiider [11]

Radiaalvõrgu asemel on mitmel pool kasutusel töökindlam ringvõrk, kus iga tarbimiskoht on ringliinile ühendatud kahe KP lüliti kaudu. Tavapäraselt avatud lüliti määrab normaallahutuskoha ning normaalse toiteteekonna. Rikke ilmumisel saab

normaalselt avatud lülitit sulgeda ja seega tagada klientidele toite. Ringvõrgus varustatakse reeglina tüviliini sama piirkonnaalajaama erinevatelt latisektsioonidelt (joonis 2.5 A), kuid mõnevõrra töökindlam on kahepoolse toitega skeem (joonis 2.5 B), mille puhul tüviliin saab toite erinevatest piirkonnaalajaamadest. [11] Normaallahutuskohta skeemil tähistatakse punase kolmnurgaga.



Joonis 2.5 Normaallahutuskoht ringvõrgus (A) ja kahepoolse toitega võrgus (B) (NA – normaalselt avatud lülitit, NS – normaalselt suletud lülitit) [11]

2.3 SCADA juhtimissüsteem

Elektrivõrgu juhtimiseks kasutatakse kesksel kontroll- ja juhtimissüsteemi SCADA. Tänu SCADA süsteemi võimekusele ja erinevatest seadmetest pärinevate andmete lihtsale integreerimisele optimeerib see jaotusvõrgu operatiivjuhtimist. [12]

SCADA süsteemi tähtsamad komponendid on

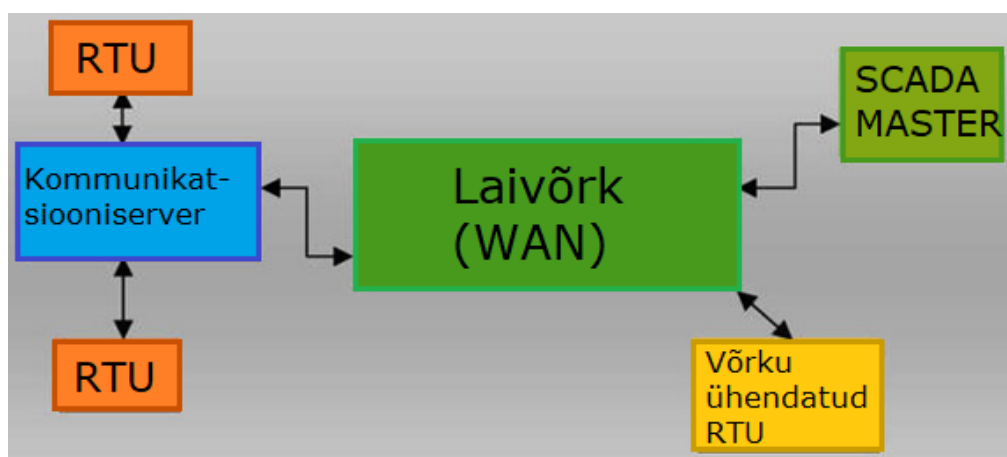
- Kasutajaliides (ingl k *Human Machine Interface*) – seade, mis võimaldab operaatoritel jälgida seadmete poolt edastatavaid andmeid. Võimaldab seadmeid kaugelt juhtida, saates operaatorite juhiseid masinatesse.
- SCADA Master – arvutiserver, kus kogutakse, säilitatakse ja töödeldakse erinevate seadmete infot ja saadetakse tagasi juhtimiskäske.
- Kaugjuhitav terminaliseade RTU või mikroprotsessoril põhinev kohtterminal (ingl k *Intelligent Electric Devices*) – toimib SCADA ja füüsiliste seadmete vahelise liidesena. See võimaldab andurisignaale konverteerida digitaalsele kujule ja edastada digitaalsed andmed SCADA Masterile.

- Programmeeritav loogikakontroller PLC – soodsam lahendus RTU-le, kasutatakse väliseadmetena. Need on mitmekülgse kasutusega, paindlikud ja seadistatavad.
- Kommunikatsioonikanalid – kommunikatsioonitaristu SCADA süsteemi ja RTU vahel.
- Füüsilised seadmed: andurid, täiturid, arvestid. [12]

Esimese generatsiooni SCADA süsteemid tulid kasutusse juba 1980-ndate alguses, kasutades suuremõtmelisi arvuteid. Viimaste kümnendite jooksul on juhtimissüsteemid arenenud, olles jõudnud neljanda generatsioonini. Neljanda generatsiooni SCADA süsteem kasutab pilvepõhiseid meetodikaid ja mitmeid avatud lähtekoodiga asjade interneti platvorme. Sellised seadmed on hõlpsalt ühildatavad, hooldatavad ja paindlikud. [12]

Senine Elektrilevis kasutatav jaotusvõrgu juhtimissüsteem on olnud kasutuses alates 2010. aastast. Elektrivõrgu veelgi paremaks juhtimiseks sõlmis Elektrilevi OÜ 2018. aastal lepingu uue juhtimissüsteemi SCADA-3 ostuks. Uuel lahendusel on täiustatud jaotusvõrgu seire ja kaugjuhtimine. Lisaks võimaldab uus juhtimissüsteem toetada tarkvõrgu arengut ja juhtida reaajas võrku. Kui 2019. aastal alustati mahukate andmete ülekandmisega uude süsteemi ja testimisega, siis 2020. aasta teises pooles võeti uus võrgujuhtimissüsteem kasutusse. [1]

Kolmanda generatsiooni ehk SCADA-3 süsteemi seadmed on omavahel ühendatud üldjuhul laivvõrgu kaudu ja selleks kasutatakse nii andmesideliine kui telefoniliine (joonis 2.6). Andmeedastamiseks kasutatakse Etherneti või fiiberoptika lahendusi ning seadmete monitooringuks ja juhtimiseks programmeeritavaid loogikakontrollereid. [12]



Joonis 2.6 Kolmanda generatsiooni SCADA süsteemi skeem [12]

2.4 SAIDI indeks

Võrguteenuse kvaliteeti iseloomustavad mitmed varustusekindluse näitajad: katkestuste keskmine sagedus tarbimiskoha kohta aastas, katkestuse keskmine kestus tarbimiskoha kohta aastas ja katkestuse keskmine kestus võrguettevõtja kohta aastas. Katkestuse kestuseks nimetatakse ajavahemikku, mis algab hetkest, kui võrguettevõtja sai teada või pidi teada saada katkestusest tema võrgus, ja lõpeb hetkel, kui elektrivarustus on taastatud. [2]

Katkestuse keskmine kestus tarbimiskoha kohta aastas (SAIDI) arvutatakse järgmise valemi alusel: [2]

$$t = \frac{\sum_{k=1}^m d_k \times n_k}{N}, \quad (2.1)$$

kus n_k – katkestuse tõttu elektrienergiata jäänud tarbimiskohtade arv;

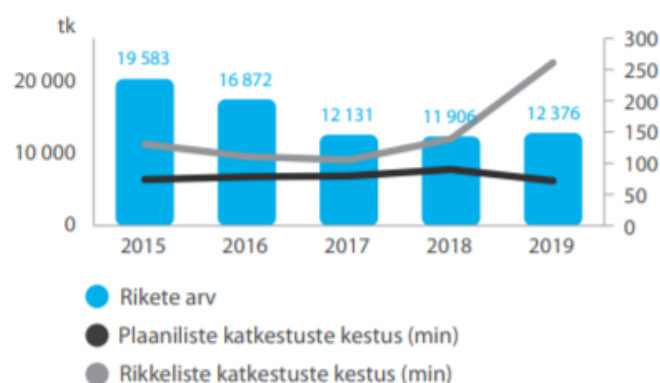
d_k – tarbimiskoha katkestuse kestus minutites;

m – tarbimiskoha katkestuste arv aastas;

N – tarbimiskohtade koguarv.

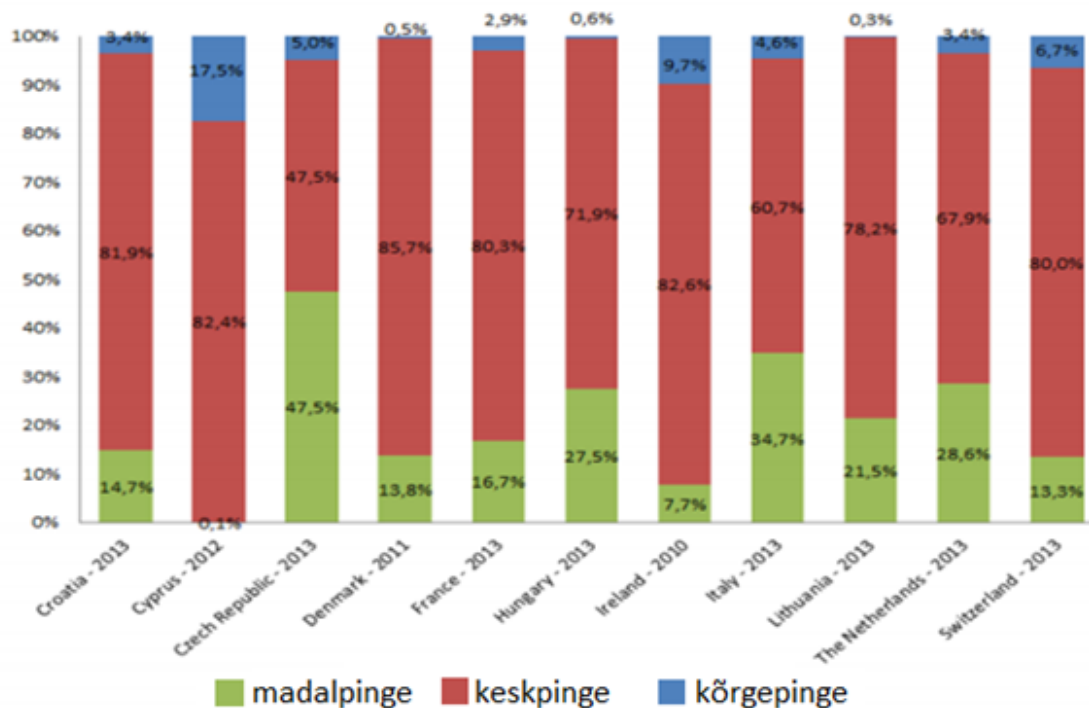
2020. aastal oli Elektrilevi OÜ rikest tingitud elektrikatkestuste keskmine kestus tarbimiskoha kohta 173 minutit [13], 2019. aastal 261 minutit, 2018. aastal 142 minutit ja 2017. aastal 105 minutit (joonis 2.7). Elektrikatkestusi aitab vähendada paljasjuhtmete asendamine ilmastikukindlate maa- ja õhukaablitega. Katkestuste ulatust ehk katkestusest mõjutatud klientide arvu saab vähendada kaugjuhitavate lülitusseadmete abil ning kestust lühendada elektrivõrku paigaldatava automaatikaga. Kaasaegse tehnoloogia ja seadmete abil saab rikkalise liinilõigu toimivast võrgust kiiresti eraldada ja sedasi võimalikult paljudele klientidele elektrivarustuse kiiresti taastada. [1]

Rikete vähenemine



Joonis 2.7 Rikete arv 2015. – 2019. aastal ning plaaniliste ja rikkete katkestuste kestus (min) Elektrilevi võrgus [1]

SAIDI indeksi moodustavad erinevate pingestmete võrkudes toimunud katkestused. Joonisel 2.8 kujutatakse 11 riigi rikkelse SAIDI statistikat. Diagrammis joonistub välja, et suurema osa indeksist moodustavad keskpinge rikked (keskmiselt 74,5%), vähem mõjutavad madalpinge rikked (keskmiselt 20,6%) ja kõige väiksemaks jääb kõrgepinge rikete mõju (keskmiselt 5%). [14]



Joonis 2.8 Konkreetsete pingestmetega võrkudes toimunud rikete mõju SAIDI indeksile [14]

Vähem madalpinge mõju võib seletada sellega, et ühe MP katkestusega seotud tarbijate arv on väike, seega ka mõju SAIDI indeksile jääb tagasihoidlikuks. Kõrgepingevõrk on üles ehitatud nii, et rikke korral ei pruugi võrgus katkestust tekkida. 2014. aastal välja antud uuringu (kirjeldatud 2.6.1 Isetaastuva võrgu lahendus Hollandi 20 kV jaotusvõrgus) näitel mõjutavad KP rikked enim SAIDI indeksit põhjusel, et võrku juhitakse manuaalselt. Võrgu automatiseerimise korral on võimalik vähendada KP rikkelse katkestuse kestust ja seega vähendada SAIDI indeksit. [15]

2.5 Tarkvõrk

Maailm liigub traditsioonilisest elektrivõrgust tulevikku vaatava elektrivõrgu ehk tarkvõrgu suunas. Tarkvõrk hakkab kontrollima erinevate energialiikide kasutust,

sealhulgas taastuvaid energiaallikaid. See võimaldab luua töökindlama ja turvalisema elektrivõrgu taristu. [16]

Tarkvõrgu puhul kasutatakse erinevaid nutiseadmeid ja –rakendusi, sidumaks energia tootjad ja tarbijad ühtsesse süsteemi. Sellega tagatakse kahesuunaline andme- ja energiavoog. Võrku saab lülitada ka sellised tarbijad, kes teatud hetkel muutuvad ise tootjateks, müües ise paigaldatud päikesepaneelilt saadud üle jäävat elektrienergiat võrku. Lisaks saab tarbija infot energiatarbimise hulgast, mis võimaldab tippkoormuse ajal vältida energiamahukate seadmete kasutamist ja planeerida nende töö madalama koormusega ajale. Selle tulemusena muutub elekter tarbijale odavamaks. [17]

Nutika tarkvõrgu kasutuselevõtt toob mitmeid olulisi muutusi energiasüsteemis (Lisa 1). Kui elektritootmises on tavapäraselt kasutatud enamasti ülisuure tootlikkusega elektrijaamu, siis tulevikus tekib võrku rohkem väiksema võimsusega taastuenergia põhinevaid tootjaid. Samal ajal on muutumas elektriturg, kus tsentraliseeritud võrk liigub detsentraliseerimise, hajatootmise suunas. Ka ülekandeliinidena ei kasutata tulevikus enam võimsaid elektriliine ja torujuhtmeid, vaid pigem väikseid ja keskmise võimsusega elektriliine. Jaotusvõrgus aga on üha hoogustumas kahesuunaline energialiiklus tarbija ja elektrivõrgu vahel. [18]

Rahvusliku Energia Tehnoloogia Laboratoorium (NETL) on iseloomustanud Kaasaegse Võrgustrateegia projektis tarkvõrku järgmiselt:

- võrk on isetaastuv peale elektrisüsteemi häireid (probleemide tuvastamine ja katkestuse mõju minimeerimine);
- tarbijad osalevad aktiivselt nõudlusele reageerimisel;
- elektrivõrk peab vastu füüsilistele rünnetele ja küberrünnakutele;
- elektrikvaliteet on tagatud vastavalt 21. sajandi vajadustele;
- arvestatakse kõigi elektritootmise ja salvestamise võimalustega;
- võimaldatakse uusi tooteid, teenuseid ja turge;
- optimeeritakse varasid ja need toimivad efektiivselt. [19]

2.6 Isetaastuv võrk

Lühisrikked elektrisüsteemi jaotusvõrgus moodustavad suurema osa klientide elektrikatkestustest. Enamikel jaotusalajaamadel on olemas reservtoite võimalus

juhuks, kui toiteliinis toimub rike. Seega saab viia rikkelse põhiliini toitel asuvad tarbijad kiiresti üle varuliinitoitele tänu automaatsele ümberlülitussüsteemile. [4]

Rikke ilmnmisel jaotusvõrgus tuvastab kaitseseade (releekaitse-, automaatikaseade) läbi mõõteseadmete rikkelse olukorra ning edastab lülitile avamiskäsu, mille tagajärjel avatakse lüliti, mis katkestab rikkelse ahela. [4]. Kui mastivõimsuslüliti on paigaldatud fiidri haruliinile, katkestatakse rikke korral ainult selle haru tarbijate toide. Erinevalt koormuslülitist võib mastivõimsuslüliti välja lülitada ka lühisvoole. [10] Mitmed jaotusfiidril ilmnevad rikked on ajutised. Kui lühis saab alguse liinile murdunud oksast, põleb lühise tekitaja tihti ära kokkupuutest äärmusliku energiavooga seadmega. Kaitseseadmena kasutatav mastivõimsuslüliti sulgeb automaatselt riket katkestava lüliti, selleks et rikke põhjustaja saaks ära põleda. Kui algset rikkepõhjustajat enam ei ole ning jaotusvõrgu seadmed jäid kahjustamata, võimaldab automaatne mastivõimsuslüliti edukalt voolu tarbijatele taastada (katkestus harilikult 5-15 sekundit). Kui aga automaatne voolusulgemise protsess esimesel korral soovitud tulemust ei anna, siis korratakse seda veel mõned korrad. Juhul kui rikke algpõhjust ei suudeta elimineerida või vooluseadmed saavad jäädavalt kahjustada, lähevad kaitseseadmed lukustatud olekusse (ingl k *lock out*). Sel juhul peavad brigaadid rikke kohapeal likvideerima ja elektriühenduse taastama. [4]

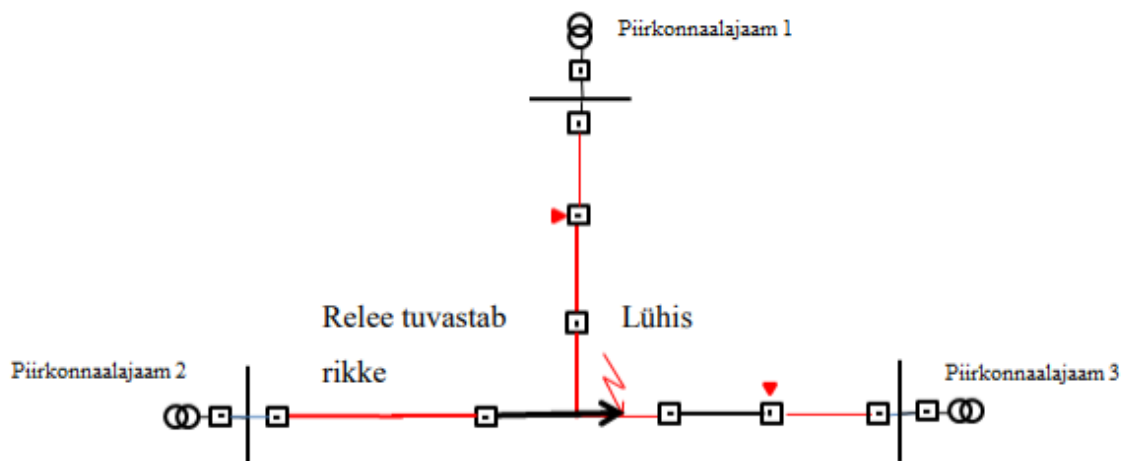
Manuaalselt teenuse taastamise protsess võib tähendada mitme tunni pikkust voolukatkestust ka neile tarbijatele, kes saavad vooluühenduse liini kahjustamata osast, sest brigaadil võtab aega riket põhjustava kohani sõitmine ja kahjustatud koha tuvastamine. Peale kahju hindamist brigaad kas parandab või isoleerib kahjustatud seadmed. Kui kahjustatud ala on füüsiliselt isoleeritud ja paigaldatud turvalised ohutusseadmed, saab käsitsi taastada voolu rikkest puutumata liiniosale. See protsess võtab keskmiselt aega 45-75 minutit, kuid piiratud ligipääsu korral kauemgi. [4]

Võrgu automatiseerimine, mida toetab kaasaegne rakenduse tarkvara ja tõhus andmeside, pakub lahendust, kus võrguteenus suudetakse taastada rikkest puutumata liiniosa toitel olevatele tarbijatele vähem kui ühe minutiga. See parandab võrgukvaliteedi indeksit SAIDI. [4]

FLISR moodul [kirjanduses kasutatakse ka lühendeid FLIR ja FDIR] 1) tuvastab rikke toimumise, 2) määrab kindlaks selle asukoha, 3) väljastab juhtkäske rikkega seotud lülitite avamiseks ja 4) taastab võimalusel voolu rikkest mõjutamata liiniosadele [4].

Automaatselt toimivate etappide järjestus täpsemalt:

1. **Rikke tuvastamine:** FLISR moodul käivitub peale fiidril või selle toiteseadmetel toimunud lühist. Selle käivitamiseks on vajalik vähemalt ühe rikkedetektori toimimine, mis tuvastab rikkevoolu. Tavapäraselt kasutatakse alajaamas mikroprotsessoril põhinevat kohtterminali või liinil mastivõimsuslüliti, mis sisaldab kaitseadmeid. Nii tehakse kindlaks, kas jaotusfiidri kaitsetsoonis on toimunud rike ja vajadusel saadetakse signaal FLISR mooduli järgmise etapi käivitamiseks. [4]

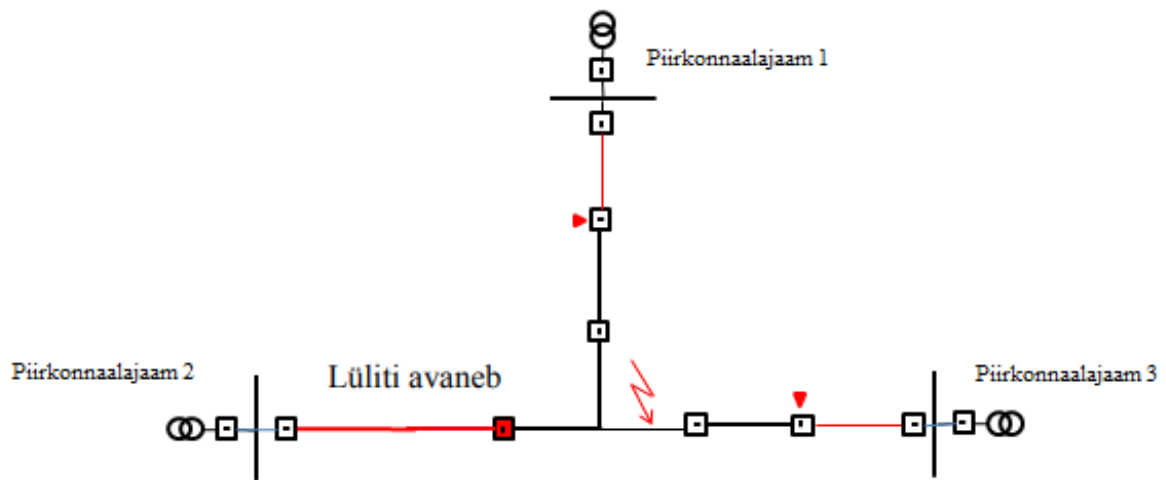


Joonis 2.9 Rikke tuvastamine [20]

Joonisel 2.9 kujutatakse olukorda, kus lühisvoolu on tuvastanud liinil asuva mastivõimsuslüliti relee. Punane kolmnurk tähistab normaallahutuskohta, kus lülidid on praegu avatud asendis.

2. **Rikke lokaliseerimine:** Vajalik on leida liinilõik, kus rike asub. Liinilõiguna defineeritakse kahe kaugjuhitava lüliti vaheline osa. Iga kaugjuhitav lüliti sisaldab rikkeindikaatorit, mis tuvastab hiljutise rikke läbimise. FLISR kasutab indikaatorilt saanud näitu ja töös oleva liini topoloogia infot selleks, et teha kindlaks rikke asukoht. Rikkeline koht on piiritletud ühelt poolt riket tuvastanud indikaatoriga ja teiselt (või mitmelt) poolt indikaatoriga, mis riket ei tuvastanud. [4]

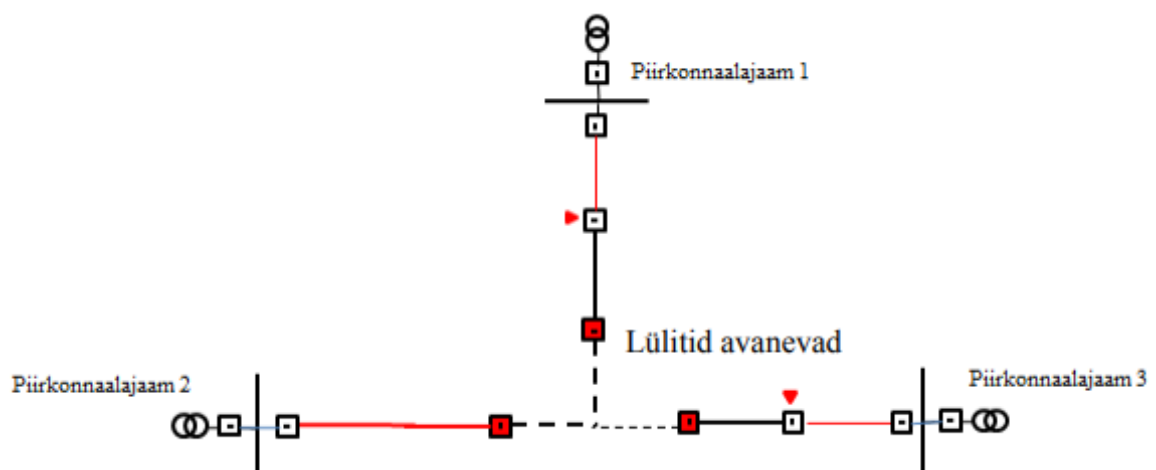
Rikke lokaliseerimise etapis joonisel 2.10 on näha, kuidas mastivõimsuslüliti, mis tuvastas rikkevoolu, on välja lülitunud. Musta värviga on tähistatud ilma tooteta jäänud liinilõigud.



Joonis 2.10 Rikke lokaliseerimine [20]

3. **Rikke isoleerimine:** FLISR väljastab juhtkäske lülitite avamiseks, et isoleerida täielikult rikkeline liiniosa, mis eelmises etapis kindlaks tehti. Kirjeldatud moodul ei rakendu enne, kui standardsed mastivõimsuslülitite lülitamistoimingud on lõpule viidud. Sellega on tagatud, et FLISR rakendub just püsivate rikete puhul, kus ei ole võimalik automaatse taaslüliti abil toidet taastada. [4]

Rikke isoleerimise etapis avanevad rikkeindikaatoritelt saadud info järgi lühisvoolu läbinud lülitid (joonis 2.11). Sellega eraldatakse rikkeline liiniosa rikkest puutumata fiidrist.

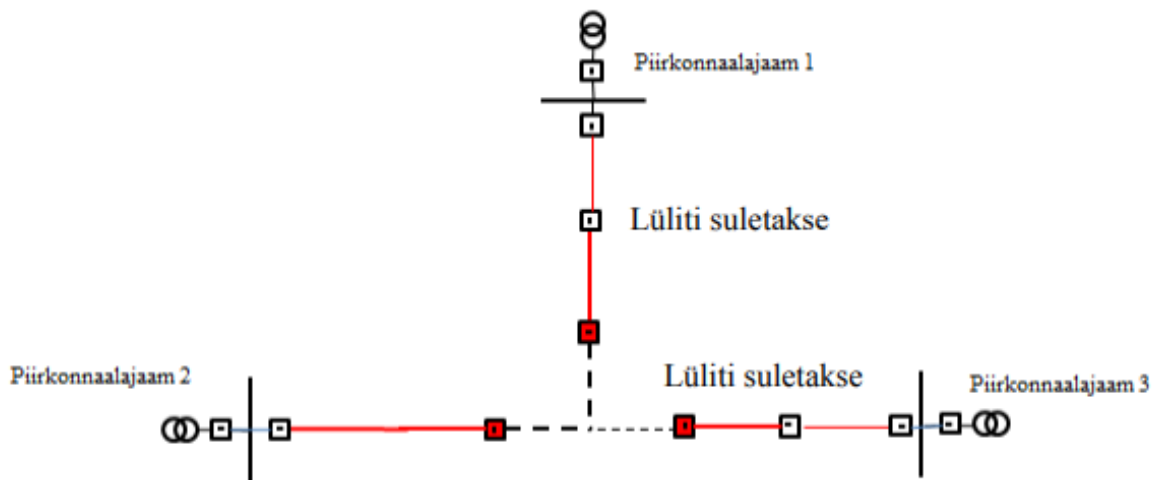


Joonis 2.11 Rikkeline liinilõigu isoleerimine [20]

4. **Toite taastamine:** Peale rikkeline liiniosa isoleerimist proovib FLISR toidet taastada võimalikult paljudele rikkest puutumata liiniosadele erinevate vahendite abil. Vahenditeks võivad olla nii normaalolukorras töös olevad seadmed kui ka kaugjuhitavad reservlülitid, mis on tavapäraselt avatud. Kui toiteliinil ei ole sobivaid

seadmeid, millega fiidrit ümber toita, ei anna FLISR moodul täiendavat kasu, võrreldes tavapärase toite taastamisega. FLISR võrdleb rikke-eelset elektrilist koormust igal rikkest puutumata liiniosal reservseadmete tagavara võimsusega. Kui võimsus sobib, suletakse reservlülitid ja taastatakse toide. Kui aga võimsus ei sobi, siis jääb vastav liinilõik toiteta, kuniks brigaad olukorraga edasi tegeleb. [4]

Toite taastamisel (joonis 2.12) on arvestatud eelmisel etapil saadud infoga ja suleti normaalskeemis avatud lülitid. Sellega on tagatud nii rikkeline liiniosa isoleerimine kui ka võimalikult paljudele tarbijatele toite taastamine.



Joonis 2.12 Toite taastamine [20]

FLISR mooduli kasutamisel on viis olulist suunda:

1. Eelistatakse liinil asuvate mastivõimsuslülitite kasutamist lülititele alajaamas. Kuna automaatse taaslülitiga liinil saab takistada rikke levimist, jääb osale fiidrist toide alles. Kasutades aga rikke levimise takistamiseks alajaamas asuvaid lüliteid, tekib volukatkestus kogu toiteliini ulatuses.
2. FLISR rakenduse kasutamisel peab olema tagatud turvalisus nii looduses töötavale brigaadile kui ka laiemale avalikkusele. Moodul ei rakendu sel ajal, kui brigaad parasjagu objektile töötab, et vältida tegevuste kattumist.
3. Võrdlus kahe arhitektuuri vahel: keskne, kus mooduli loogika asub juhtimiskeskuses või IT andmekeskuse serveris, ja detsentraliseeritud, mille puhul mooduli loogika asub alajaamade protsessorites ja mastide seadmetes. FLISR moodul toimib mõlema arhitektuuri puhul ja mõlemal on omad eelised.
4. Hajutatud energiatootmine avaldab mõju FLISR mooduli toimimisele. Mahukad generaatorid võivad takistada täpse rikke asukoha määramist. Seetõttu kasutatakse rikkeindikaatoreid, mis tuvastavad rikkevoolu ja ka selle suuna. Lisaks võib generaatorite töö põhjustada ebatäpseid rikke-eelseid koormusarvutusi.

5. Erakordsete ilmastikunähtuste ja tormide ajal lülitatakse sageli FLISR tööst välja. Põhjenduseks tuuakse ebatäpne rikete lokaliseerimine, kui ühe fiidri erinevatel liinilõikudel tekib lühikese ajavahemiku jooksul mitu riket. Samas mitmed ettevõtted, kes on hiljuti juurutanud FLISR moodulit, on otsustanud seda ka tormi ajal kasutada, viidates mitme rikke harvale esinemisele üheaegselt ja automaatika eelistele erakordsetes oludes. [4]

2.6.1 Isetaastuva võrgu lahendus Hollandi 20 kV jaotusvõrgus

Hollandi võrguettevõtte Stedin viis läbi pilootprojekti, mille käigus integreeriti oma jaotusvõrku automatiseeritud seadmeid. Lihtsama lahendusena lisati võrku kaugjuhitavaid rikke läbimise indikaatoreid, kuid keerukamad lahendused sisaldasid ka kaugjuhitavaid põhiseadmeid. Lõpuks rakendati automatiseerimist sel määral, et loodi kaks täielikult isetaastuvat fiidrit FLISR mooduli näitel. [15]

Pilootprojekti katsetati, milline võiks olla automatiseerimise aste, et sellel oleks tuntav mõju katkestuste kestuse vähendamisele. Kõikide KP/MP alajaamade automatiseerimine ühel fiidril oleks liiga kulukas ning ebavajalik SAIDI indeksi vähenemise osas. Juba mõnede KP/MP alajaamade automatiseerimine avaldab olulist mõju SAIDI indeksile. Toite taastamise etapis on väga oluline normaallahutuskohtade olemasolu ja seetõttu on vajalik nende liiniosade automatiseerimine. Rikke korral võib olla erinevaid võimalusi, kuidas toide keskpinge võrgus taastada. [15]

Projekti läbiviimiseks lisati ühel fiidril kuuele KP/MP alajaamale vajalikud seadmed:

- mootoriga ajam lülitite juhtimiseks;
- kohalik juhtplokk LCU;
- RTU;
- rikkeindikaatorid;
- pingeindikaatorid;
- aku;
- kommunikatsiooniks GPRS modem ehk kiire sideteenus. [15]

Lisaks kasutati ka automatiseeritud kaugjuhitavaid võimsuslüliteid piirkonnaalajaamas [15].

Pilootprojekti raames võeti Hollandis kasutusele isetaastuva võrgu algoritm, mis töötati välja ettevõttes SIEMENS. Algoritm loodi kaugjuhitava juhtploki tarkvarale ja rakendati hetkel, kui elektrivõrgus ilmnes rike. [15]

Projekti läbiviimisel pöörati tähelepanu dispetšerite ja hooldusinseneride väljaõppele, sest isetaastuva võrgu kasutuselevõtt muudab nende senist tööprotseduuri. Uue süsteemi rakendamisest tuleb eelnimetatud inimesi juba projekti varajases staadiumis informeerida. Põhilised märksõnad on turvalisus, aktiivne osalemine ja usk projekti õnnestumisse. Enesekindluse ja kogemuse saamiseks viidi läbi mitmesuguseid rühmatöid ja ettekandeid, kus esitleti uut tehnoloogiat. Lisaks kasutati kogu süsteemi seadistamiseks testkeskkonda, kus matkiti nii lülitate asendeid kui releekaitselt ja rikkeindikaatoritelt saadavaid signaale. See võimaldas läbi mängida erinevaid rikkestsenaariume ja demonstreerida süsteemi käitumist. Lisaks toodi välja, et isetaastuva võrgu funktsionaalsus tuleb paremini esile ringvõrgus, kus on eelistatult üks normaallahutuskoht. [15]

2.6.2 FLISR moodul Soome jaotusvõrgus

Soomes uuriti lahendust, kus kombineeriti arvutirakendust ja jaotusvõrgu juhtimissüsteeme SCADA/DMS. Kasutatud arvutirakendus lõi fiidris asetsevatelt seadmetelt saadud info baasil toite taastamise plaani. [21]

Soome jaotusvõrgu näitel tuuakse rikete haldamise protsessi kõige kriitilisema faktorina välja rikkekoha tuvastamine. Lühisrikke korral lülitub kaitse välja ja rike tuvastatakse toitelüliti avanemise hetkel. See sündmus algatab rikke haldamise protsessi. Sarnaselt Hollandi näitele nenditakse ka Soomes FLISR mooduli rakendamise puhul, et ei ole mõistlik paigaldada igasse KP/MP alajaama täisautomaatseid seadmeid. Väga oluline on rikkeline liinilõik kiiresti tuvastada, tekitamata lisahäireid ülejäänud võrgus. Praktikas toimib see kõige paremini usaldusväärsete rikkeindikaatorite olemasolul. [21]

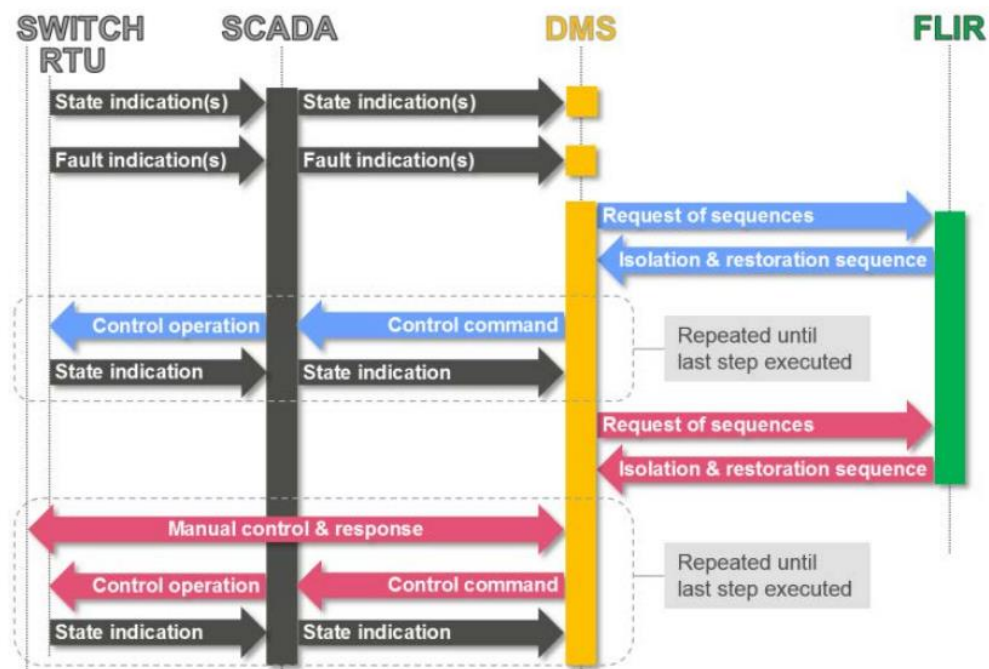
Lühisrikke puhul toimib täisautomaatne rikete haldamise protsess Soomes näitel alljärgnevalt:

1. Rike tuvastatakse, kui relee töö tõttu lülitub välja võimsuslülit.
2. DMS-is analüüsitakse rikke toimumise ajal võrgutopoloogiat.
3. DMS-i kogutakse informatsiooni täielikult automatiseeritud jaotusalajaamadelt; saadakse mõõtmistulemused ja tuvastatakse rikkevool.
4. Vaadeldakse aktiivseid rikkeindikaatoreid kuni rikkeline liinilõiguni.
5. Rikkeline liinilõigu isoleerimiseks luuakse lülitusjärjestus ja võimalusel taastatakse põhiliinis toide.

6. Analüüsitakse topoloogiat ja kontrollitakse, kas rikkeline liinilõigu järel asub automatiseeritud liinilõik, millel saaks toite taastada.
7. DMS esitab SCADA süsteemile lülitusjärjestuse, mida hakatakse rakendama.
8. Peale edukat lülitusprotsessi analüüsitakse DMS-is võrgutopoloogiat, et tuvastada ilma toitetat liinilõigud ja kogutakse nende kohta rohkem teavet.
9. DMS-is võrreldakse rikkeindikaatoritelt mõõdetud voolutulemusi ja need kuvatakse võrgudiagrammile.
10. Nüüd isoleeritakse rikkeline liinilõik nii manuaalsete kui kaugjuhitavate lülitite abil ning ülejäänud osale liinist taastatakse toide. [21]

Püsiva maaühendusrikke puhul automaatset lülitust ei kasutata. Selle asemel kogub DMS infot võrgutopoloogiast ja rikkeindikaatoritelt ning tuvastab ligikaudse rikkeline liinilõigu asukoha. Lülitite asendeid muudavad operatiivselt jätkuvalt juhtimiskeskuse dispetšerid. [21]

Joonisel 2.13 on näha automaatse rikete haldamise protsessi järgnevusdiagramm. DMS saab SCADA kaudu andmeid lülitite asendite muutustest [ingl k *state indication(s)*] ja seadmeid läbivast rikkevoolust [ingl k *fault indication(s)*]. Diagrammil sinised jooned tähistavad kõrgemal tasemel ja roosad jooned madalamal tasemel toimuvaid tegevusi rikete haldamises. [21]



Joonis 2.13 SCADA ja DMS-i ühiskasutuse järgnevusdiagramm [21]

2.6.3 Uuring FLISR mooduli simulatsioonist ja testimisest

FLISR mooduli rakendamine on üks võimalus saavutada isetaastuv võrk. See aga vajab enne töösse rakendamist põhjalikku testimist. Ei ole otstarbekas testida ja kontrollida fiidri automaatikat reaalselt töötavas jaotusvõrgus, sest see tekitaks lühisvoolu ja rikuks seadmeid. FLISR mooduli usaldusväärsuse tagamiseks kasutatakse mitmeid simulatsioonitehnoloogiaid, kus kontrollitakse süsteemi funktsioone rakendamise erinevates etappides. [22]

Võimalusel tuleks igat FLISR süsteemi funktsiooni testida läbi simulatsioonikeskkonna. Eri etappidele esitatavad testimise nõuded ja tehnoloogiad varieeruvad ning pole olemas ühest testimise tehnoloogiat, mis sobiks täielikult kogu süsteemile. FLISR mooduli testimise edukus sõltub järgmistest teguritest: SCADA funktsioonid, kommunikatsioon, rikke tuvastamine ja rikete käsitlemise algoritm. Testimise nõuded võib jagada mitmesse kategooriasse: põhiline jälgimine ja kontroll, aku mahutavus, rikete avastamise võime, releekaitse ja alajaama koostoime ning rikete käsitlemise protseduur. Arendamise etapis peab fookus minema sellele, kas rikete käsitlemise algoritm tuleb toime võrgutopoloogiaga, mitme samaaegse rikkega, erineva asukohaga rikutega ja tavapäratute olukordadega. Algoritm peab toimima igas olukorras veatult. Järgmises etapis suunatakse fookus FLISR mooduli täielikule kontrollimisele jaotusvõrgus. Viimase etapi eesmärk on kontrollida süsteemi karakteristikuid ja funktsioone võimalikult tõepärases keskkonnas. Tavapraktikas testitakse süsteemi paljudes tüüpilistes liinilõikudes, mitte terves jaotusvõrgus. [22]

Lisaks tuleb simulatsioonikeskkonnas rikete haldamise protseduuris jälgida füüsiliste karakteristikute ajalist järjestust ja fiidriterminalide tööprotseduuri. Oluline on arvestada simulatsioonikeskkonna mahuga ehk maksimaalse fiidrite arvuga, mida keskkond suudab töödelda, ning jälgida protsessiks kuluvat aega (näiteks üks minut, mis peaks kujutama reaalselt olukorda). Ka tuleb pöörata tähelepanu sellele, et erinevad rikete haldamise algoritmid ühilduksid omavahel simulatsioonikeskkonnas. [22]

Simulatsiooni- ja testimise tehnoloogiad võib jagada kolmeks: riistvara simulatsioon, tarkvara simulatsioon ja hübriidsimulatsioon. Riistvara simulatsioon hõlmab seadmete testimist, näiteks lülitite toimimist rikkevoolu läbimisel ning releekaitse ja FLISR mooduli koostoimet. Riistvara saab tõhusalt testida simulatsiooni- ja testlaboratooriumis, kus on kujutatud dünaamilist elektrisüsteemi, keskendudes jaotusvõrgu toimimisele ja integreerides releekaitse ja automaatika tehnoloogiaid. Tüüpiliselt sisaldab

simulatsioonikeskkond jaotusvõrgu mudelit, releekaitse- ja automaatikasüsteemi ning juhtimiskeskust. [22]

FLISR simulatsioonikeskkonna tarkvara peaks sisaldama järgmisi osasid:

1. Jaotusvõrgu simulatsioon – kasutatakse elektrisüsteemi elektrilisi parameetreid ja arvutatakse vool fiidrite sõlmpunktides.
2. Rikk simulatsioon – määratakse rikkeliised kohad elektriskeemis ja arvutatakse nende põhjal rikkevoolud vastavates füüsilistes seadmetes, mis saadetakse fiidriterminalidesse.
3. Automaatikaseadmete simulatsioon – reaalse jaotusvõrgu parameetrite põhjal kirjeldatakse skriptide abil kaitseadmete, fiidriterminali ja lülitusseadme järjestikusi tegevusi.
4. Juhtimise simulatsioon ja graafika tööriistad – graafilist liidest kasutatakse simulatsiooniprotsesside juhtimiseks, kuid ka joonistamise tööriistana, tegevuste kuvamiseks, rikete määramiseks ja tulemuste esitamiseks. Simulatsioonis saab näidata tavapäratuid toiminguid automaatjuhtimises, näiteks sideühenduse probleeme juhtimiskeskuse ja terminali vahel ning valelülitusi.
5. Tulemuste võrdlus – peale rikete matkimist testsüsteemis peaks saama ühe korrektse rikete haldamise käsitluse. Seda käsitlust võrreldakse parasjagu testitava rikete haldamise algoritmiga. [22]

Elektrilevi üheks pikaajaliseks eesmärgiks on võrgu töökindluse suurendamine ja SAIDI indeksi vähendamine. Kuna SAIDI indeksit mõjutavad enim keskpingses toimuvad rikkeliised katkestused, siis aitab võrguseadmete automatiseerimine vähendada katkestuse kestust. Üks võimalus tõhustada dispetšerite tööd ja seeläbi vähendada SAIDI indeksit, on võtta kasutusse isetaastuva võrgu rakendus.

3. FLISR MOODULI SEADISTUSPÕHIMÕTTED

Alates 2020. aasta lõpust on järk-järgult hakatud Elektrilevi võrgu juhtimispiirkondi üle viima uuele SCADA-3 juhtimissüsteemile. Kui eelmises juhtimissüsteemis viisid juhtimiskeskuse dispetšerid manuaalselt läbi rikete lahendamise etappe, siis uuel SCADA-3 tarkvaral on võimekus rakendada isetaastuva võrgu lahendust. FLISR moodul suudab asendada esimesi dispetšjuhtimise samme, vähendades paljude klientide jaoks elektrikatkestuse kestust. Käesolevaks hetkeks ei ole FLISR moodulit ettevõttes Elektrilevi OÜ veel kasutusse võetud. Järgnevalt tutvustatakse autori läbiviidud uurimuse eesmärki, vajalikku tarkvara, meetodikat, sündmuste valimit ning esitatakse uurimuse tulemused ja järeldused.

3.1 Uurimuse eesmärk

Käesoleva töö empiirilise osa eesmärk on selgitada välja FLISR mooduli kasutamise võimalused Elektrilevi elektrivõrgu juhtimissüsteemis. Lisaks tehakse ettevõttele parendussoovitusi, et rakendada isetaastuva võrgu lahendust.

3.2 Vajalik tarkvara

Töö autor kasutas katsete läbiviimiseks kahte tarkvara:

- Trimble DMS – katkestuse haldussüsteem, kus saab infot elektrivõrgus toimunud katkestustest, kuvatakse rikkekoht ja rikke põhjustanud seade, saab väljavõtte rikke ajal toimunud sündmustest.
- SCADA juhtsüsteem – süsteem, milles kuvatakse reaajas võrguandmed, sisaldab ka simulatsioonikeskkonda, milles saab testida erinevaid sündmusi.

3.2.1 Mooduli profiilid SCADA juhtsüsteemis

Profiil on mooduli seadistus, mis määrab ühe keskpingeiidri löikes mooduli käitumise. Võimalikud profiilid on manuaalne ja automaatne (normaalrežiim või tormirežiim). Automaatse profiili korral rakenduvad mooduli etapid tarkvaras iseseisvalt vastavalt

seadistusele ning ei vaja kasutaja sekkumist. Iga eelmise etapi tulemused on määratud järgmisele etapile sisendiks. Automaatset profiili on võimalik lülitada ka tormirežiimile, mis tagab ettenähtud töö eritingimustes. Antud töö raames rakendati fiidritele testkeskkonnas manuaalselt kontrollitavat FLISR profiili. Manuaalse profiili puhul on vaikimisi määratud sisendvalikute komplekt, mida kasutaja saab muuta enne iga FLISR etapi käivitamist. Programm soovib, milliseid lülitustoiminguid teha, aga kasutaja annab ise käsklusi lülitite asendite muutmiseks. [Elektrilevi sisene kinnine dokumentatsioon]

3.2.2 Kasutatavad FLISR mooduli etapid

Rakenduse etappide järjestus automaatses profiilis:

1. Rikke tuvastamine – rikke tuvastamise väljundiks on kogum elementidest, mille seas on võimalik rike.
2. Rikke isoleerimine – käivitatakse automaatselt, kui eelmine etapp töötas edukalt. Kui eelmises etapis riket ei tuvastatud, ükski element ei ole rikkeliseks märgitud, siis automaatse profiili korral FLISR peatub. Sel juhul tekib alarm, mille puhul dispetšer saab jätkata rikke haldamist manuaalselt. Selle etapi tulemuseks on nimekiri lülitustegevustest, mis võimaldavad rikkelise liinilõigu isoleerida. Nimekirjas on ainult kaugjuhitavad lülited. Kui rikke isoleerimise arvutused ebaõnnestuvad, siis mooduli töö peatub.
3. Toite taastamine – etapp rakendub automaatselt, kui eelmise etapi lülitustoimingud on edukalt lõpule viidud. Rikkelise fiidri pingestamata elemendid, mida ei isoleeritud eelmises etapis, kuuluvad toite taastamiseks vajalike elementide nimekirja. Eelmises etapis isoleeritud elemendid lisatakse elementide hulka, mis peavad jääma pingetuks. Toite taastamise etapis luuakse lülitusjärjestus rikkest puutumata osade pingestamiseks, kasutades vaid kaugjuhitavaid lüliteid. Luuakse vaid üks lülitusjärjestus, arvestades eelnevalt määratud rakenduse seadeid. [Elektrilevi sisene kinnine dokumentatsioon]

3.2.3 Tingimused mooduli käivitamiseks

Rakenduse käivitamise eeltingimuseks on katkestuse tekkimine. Katkestus luuakse võrgutopoloogia muutumisel, kui tekib uus pingetu liinilõik (lihtsustatult tähendab, et seade on ühelt poolt pingestatud, teiselt poolt pingeta). Lisaks saab profiili seadistuses märkida mooduli käivitamiseks täiendavad tingimused:

- Seadme oleku muutus peab olema käsuta (ingl k *un-commanded*) ehk käsklust lüliti avamiseks ei saadetud läbi SCADA juhtsüsteemi.
- Ajaline viivitus defineerib aja (sekundites), peale mida rakendus alustab kalkulatsioone. Aega loetakse alates hetkest, kui saadakse signaal, et seade on läinud avatud olekusse. Antud parameetri rakendamisega saab eristada mööduvaid ja püsivaid rikkeid. Kasutatakse eelkõige juhul, kui puuduvad usaldusväärsemad näitajad (nt mastivõimsuslüliti lukustumine või releekaitse tuvastatud signaalid).
- Mastivõimsuslüliti lukustumine – automaatsel FLISR profiilil võib kasutada signaali (alarm), mis näitab, et mastivõimsuslüliti on läinud lukustatud olekusse peale mitmekordset voolusulgemise katset (riike on jäänud püsima).
- Relee väljalülitamise alarm näitab, et relee on tuvastanud rikke ja välja lülitunud. Kasutaja saab seadistada, millist tüüpi releede puhul antud signaal mooduli käivitab. [Elektrilevi sisene kinnine dokumentatsioon]

Neid tingimusi saab konfigureerida ja kombineerida, kuid viimase kolme parameetri seast peab alati vähemalt üks olema märgitud, et automaatse profiili korral moodul rakenduks. Manuaalne profiil ei sisalda eelnimetatud parameetreid mooduli käivitamiseks. [Elektrilevi sisene kinnine dokumentatsioon]

3.2.4 Rikke tuvastamise meetodid

Rikke tuvastamise etapi käivitamiseks on vajalik, et looduses asuv kaitseseade tuvastaks rikkelse olukorra fiidril ja edastaks alarmeeriva diskreetsignaali SCADA juhtsüsteemi. Kui fiidril asuv lüliti avaneb, hakatakse lülitist allavoolu jäävate seadmete hulgast välja selgitama potentsiaalseid rikkelseid seadmeid. Selleks arvestatakse võrgumudelit, topoloogiat, signaale, rikkelist fiidrit ja kohalikke võrke. Sõltuvalt toiteliinil asuvatest seadmetest valitakse rikke tuvastamiseks sobivaim meetod:

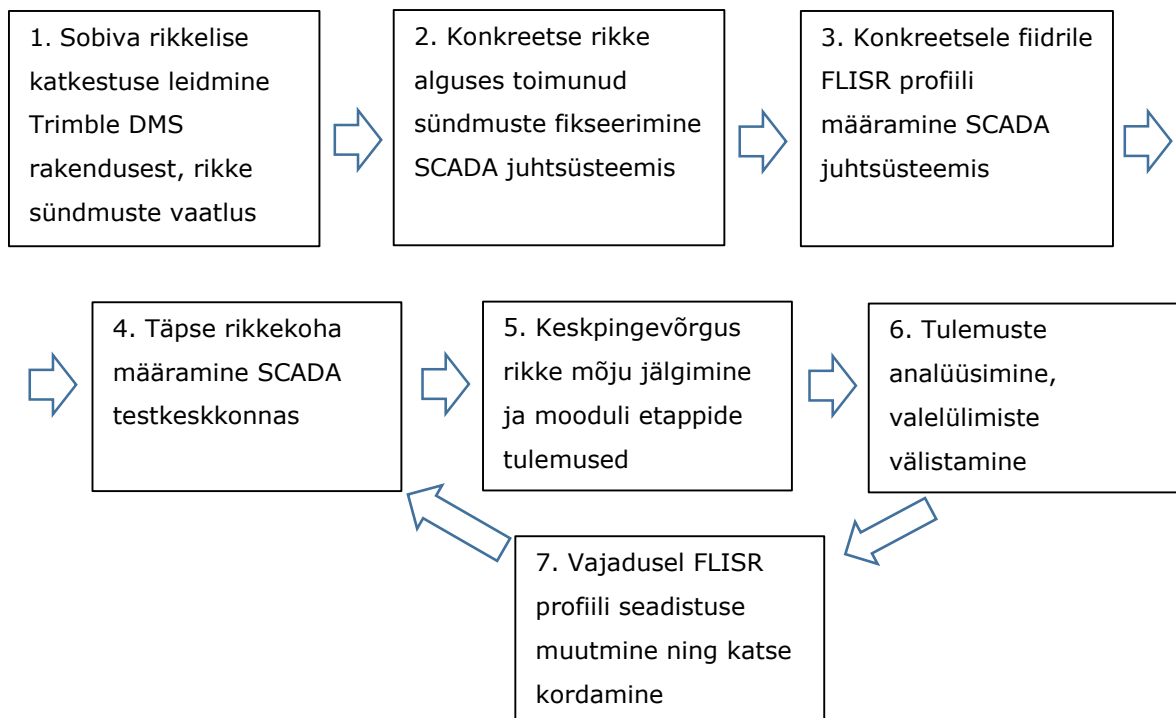
- Rikkeindikaatori meetod – info põhineb liinil asuvatelt rikkeindikaatoritelt, mis edastavad juhtsüsteemile info rikkevoolu läbimise kohta. Mida rohkem on rikkeindikaatoreid liinil, seda efektiivsemalt meetod töötab.
- Rikkevoolu meetod – info tuleneb mõõdetud lühisvoolul ja mikroprotsessoril baseeruvatel kaitsereleedel või häiresalvestitel, mis registreerivad elektrivõrgus pingete muutused ajas.
- Rikke impedantsi meetod – meetodi kasutamiseks on vajalik häiresalvestite olemasolu, põhineb rikke tüübil ja mõõdetaval näivtakistusel. Vajalike muutujate väärtused saadakse mikroprotsessoril põhinevalt kohtterminalilt, kaitsereleedelt

või häiresalvestitelt. Nõutavate andmete osas on antud meetod komplekssem kui voolumeetod.

- Reaktantsi meetod – põhineb rikke tüübil ja mõõdetaval reaktantsil, kus andmed saadakse kaitserleedelt (mõõdetud reaktantsi väärtused rikkest kuni kaitseadmeni). [Elektrilevi sisene kinnine dokumentatsioon]

3.3 Metoodika

Töö uurimuslik osa viidi läbi perioodil 26.03.2021 – 08.05.2021. Vaatluse alla võeti neli elektrivõrgus toimunud riket ja katsete käigus rakendati igale rikkest mõjutatud fiidriale eraldi FLISR moodulit. Iga katse tegevused viidi läbi kindlas järjekorras (joonis 3.1). Esmalt filtreeriti viimase 90 päeva jooksul keskpinge võrgus toimunud rikkeliste katkestuste seast välja huvipakkuv rike. Teiseks fikseeriti möödunud rikke alguses toimunud sündmused SCADA juhtsüsteemis. Kolmandaks määrati vaadeldud fiidriale FLISR profiil. Neljandaks määrati simulatsioonikeskkonnas rikke täpne asukoht. Viiendana jälgiti, kuidas matkitud rike mõjutas keskpinge võrku ja vaadeldi FLISR mooduli etappide tulemusi. Seejärel analüüsiti tulemusi ja välistati valelülid. Katse viimases etapis muudeti vajadusel profiili seadistust ning korrati katset samal fiidril.



Joonis 3.1 Metoodika protsess [autori koostatud]

Antud töös keskenduti dispetšeri tegevustele katkestuse esimestel minutitel. Läbiviidud katsetes jälgiti FLISR mooduli esimese kolme etapi toimimist. Kuna järgmised etapid saavad sisendid eelnevalt läbitud etappidest, võeti fookusesse rikke tuvastamine, rikke lokaliseerimine ja isoleerimine. Antud töös tehti mooduli rakendumisest järeltõlge visuaalse vaatluse teel, kasutades süsteemis olemasolevaid visualiseerimise võimalusi. Vaadeldi ka rikke matkimisel tekkinud alarme. Peale igat katset täiustati FLISR mooduli seadistust ja üldistati katse tulemusi.

3.4 Sündmuste valim

Käesolevas töös vaadeldi Saare juhtimispiirkonnas toimunud rikkest põhjustatud katkestusi. Elektrilevi võrgus kuuluvad Saare piirkonda Saaremaa ja Hiiumaa. Need viidi esimese piirkonnana 19. detsembril 2020. aastal üle eelmiselt SCADA juhtimissüsteemilt SCADA-3 süsteemile. Seetõttu on käesolevaks hetkeks Saare piirkonna dispetšeritel kõige enam kogemusi uue SCADA-3 tarkvara kasutamisega.

Vaatluse alla võeti ainult keskpinges toimunud rikkeline katkestused. Keskpinges toimunud katkestused mõjutavad rohkemaid kliente kui madalpinge rikked ning KP rike on suurem mõju ka SAIDI indeksile [15]. Rikkeline katkestuste põhjuseks on eelkõige ilmastik [1]. Suurematest tormidest mõjutatud Saare piirkond osutus valituks ka oma geograafilise asukoha tõttu.

Analüüsimiseks sobiv rikkeline katkestus valiti välja, arvestades rikkekoha asukohta toiteliinil. Ühele fiidriks ei ole võimalik simulatsioonikeskkonnas tekitada samaaegselt mitut rikkekoha. Seetõttu valiti vaatluseks sellised rikkeline katkestused, mille algpõhjus seisnes ühe konkreetse liinilõigu või masti rikkes.

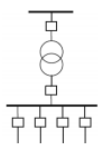
Autori poolt läbiviidud detailsed katsete kirjeldused on toodud Lisades, milles muudeti alajaamade, lülitite ja fiidrite nimesid:

1. MINNI 35/10 – fiider 1 (Lisa 2)
2. KOSMOSE 35/10 – fiider 3 (Lisa 3)
3. KAPTENI 110/35/10 – fiider 2 (Lisa 4)
4. LEGOLA 35/10 – fiider 4 (Lisa 5)

Katsete kirjeldustesse on lisatud keskpingefiidrite skeemid, mis kujutavad lihtsustatult vaadeldud toiteliine.

Fiidriskeemidel kujutatud tingmärgid:

Oranž kast ümbritseb kaugjuhitavaid alajaamasid ja lüliteid.



piirkonnaalajaam



käsitsi juhitav KP/MP alajaam



kaugjuhitav KP/MP alajaam



normaalselt suletud lüliti liinil



normaalselt avatud lüliti liinil



normaallahutuskoht



rikkekoht liinil

3.5 Uurimuse tulemused

Katsete käigus fikseeriti tulemused, mis grupeeriti kolmeks osaks (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Läbiviidud uurimuse tulemused

Üldised tähelepanekud
1. FLISR mooduli rakendamine on otstarbekas juhul, kui fiidril on reservtoite võimalus.
2. Moodul töötleb andmeid väga kiiresti ja suudab sekundiga anda tulemused ühele konkreetsele etapile.
3. Seadistuses tuleb märkida, et võimalike valikutena näidataks vaid kaugjuhitavaid seadmeid.
I etapp: rikke tuvastamine
1. Esimene etapp algas kolmel juhul neljast piirkonnaalajaama võimsuslüliti avanemisega rikkelisel fiidril. Sel juhul tuvastatakse rike kogu liini ulatuses.
2. See etapp annab korrektseid tulemusi juhul, kui võrgus on sobivad seadmed, näiteks releekaitse, rikkeindikaator.
3. Rikke tuvastamiseks on vajalik, et lülitel on alarmeerivad signaalid, mis näitavad SCADA juhtsüsteemile, kas seadet on läbinud rikkevool.
4. Selles etapis näidatud protsendid ei ole täpsed, et määrata konkreetne rikke asukoht.
II-III etapp: rikke lokaliseerimine ja isoleerimine
1. Rikke isoleerimise etapp on efektiivne juhul, kui rike on täpselt tuvastatud esimeses etapis.

2. Rikke isoleerimisel soovitab moodul läbi viia mitu järjestikust lülitamist.
3. Kahel juhul neljast oleks saanud rikkelse lõigu pikkust oluliselt minimeerida, kui liinil oleks rohkem kaugjuhitavaid liinilüliteid.
4. Kui rike asub haruliinil, on rikkelse liinilõigu lokaliseerimiseks ja isoleerimiseks vajalik kaugjuhitav liinilüliti haruliini alguses.

3.6 Tulemuste analüüs

Käesoleva töö empiirilise osa tulemusena tehti tähelepanekuid FLISR mooduli toimimisest ja toodi välja, millistel tingimustel saab antud moodulit efektiivselt kasutada. Autori poolt läbiviidud katsed näitasid, et vaadeldud Saare piirkonna fiidrid ei sisalda piisaval määral kaugjuhitavaid seadmeid. Iga rikkelse katkestuse korral ei õnnestunud FLISR moodulit efektiivselt rakendada. Moodulit ei ole otstarbekas kasutada siis, kui fiidril puudub reservtoite võimalus. Autor toob välja, et fiidril asuvatele lülititele alarmeerivate signaalide määramine annab rakendusele sisendi rikkekoha tuvastamiseks testkeskkonnas.

Autori arvates annavad läbiviidud katsed adekvaatse hinnangu Saare juhtimispiirkonnas asuvatest kaugjuhitavatest seadmetest. Katseid tuleks korrata ka teistes Eesti juhtimispiirkondades, et võrrelda tulemusi ja teha järeldusi piirkondlike eripärade kohta.

Tulenevalt läbiviidud katsete tulemustest tuuakse järgnevalt välja parendusettepanekud isetaastuva võrgu lahenduse rakendamiseks.

Kuna mooduli eesmärk on kiiresti taastada toide klientidele, kes asuvad mitterikkelse liinilõigul, on parim võimalus kasutada kaugjuhitavaid seadmeid. Uurimust läbi viies analüüsiti mitut fiidrit, millel on kas kõik või enamus liinilüliteid ainult käsitsi juhitavad. Sellest tulenevalt teeb autor ettepaneku analüüsida mitmete käsijuhitavate lülitite väljavahetamise otstarbekust, et rikkeline liinilõik mõjutaks võimalikult vähe kliente.

Kuna katsete läbiviimisel kasutati mooduli manuaalset profiili, pakub autor välja võimaluse, et manuaalselt seadistatav moodul võiks olla dispetšerile abivahendiks katkestuste haldamisel. Rakendus töötleb andmeid kiiresti, võttes arvesse kogu teadaolevat infot. Automaatselt rakenduva mooduli töökindlus vajab enne kasutusse võtmist põhjalikku testimist testkeskkonnas.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli selgitada välja FLISR mooduli kasutamise võimalused Elektrilevi elektrivõrgu juhtimissüsteemis. Lisaks tehti ettevõttele parendussoovitusi, et rakendada isetaastuva võrgu lahendust.

Eesmärgi täitmiseks tutvuti valdkondliku kirjandusega ja anti teoreetiline ülevaade põhivõrgust ja jaotusvõrgust, jaotusvõrgu juhtimisest, SCADA juhtimissüsteemist, SAIDI indeksist, tarkvõrgust ja isetaastuva võrgu moodulist FLISR. Kirjeldati eelnevalt läbiviidud mooduli uuringuid Hollandi ja Soome jaotusvõrgus ning uuringut simulatsiooni- ja testkeskkonna kasutamisest.

Tuginedes teoreetilistele teadmistele, viidi läbi töö uurimuslik osa, kus võeti aluseks märtsis-aprillis 2021. aastal toimunud rikkeline katkestused Saare juhtimispiirkonnas. Viidi läbi neli katset, kus matkiti realselt toimunud rikkekohti SCADA-3 testkeskkonnas, katsetati erinevaid FLISR mooduli seadistusi ja tehti igast katsest järeldused. Tehtud katsete põhjal formuleeriti uurimuse tulemused ja analüüsiti neid.

Tehtud katsete tähtsamad tulemused:

1. Mooduli rakendamine on otstarbekas juhul, kui fiidril on reservtoite võimalus.
2. Moodul töötleb andmeid kiiresti ja edastab tulemused sekundiga.
3. Valikutena tuleb märkida vaid kaugjuhitavate seadmete kasutamine.
4. Mooduli esimene etapp annab täpseid tulemusi juhul, kui elektrivõrk sisaldab piisaval määral sobivaid kaitseseadmeid.
5. Rikke tuvastamiseks on vajalik alarmeerivate signaalide edastamine SCADA juhtsüsteemile.
6. Rikke isoleerimise etapp on efektiivne juhul, kui rike on esimeses etapis täpselt tuvastatud.
7. Rikke isoleerimisel soovib moodul läbi viia mitu järjestikust lülitamist.

Autori poolt läbiviidud katsete tulemuste põhjal saab väita, et Saare juhtimispiirkonnas vaadeldud fiidrid ei sisalda piisaval määral kaugjuhitavaid seadmeid. Kuna töö läbiviimisel keskenduti vaid mooduli esimesele kolmele etapile, ei saa teha lõplikke järeldusi kogu rakenduse tulemuslikkuse kohta. Katsete läbiviimisel puututi kokku mitme mooduli rakendamist piirava teguriga: puuduv reservtoite võimalus fiidril, vähene arv kaugjuhitavaid liinilüliteid.

FLISR mooduli edasisteks katseteks soovib autor selgitada välja:

- kui täpsed on rakenduses rikkevoolu arvutused ja millal eelistada rikkekoha tuvastamiseks voolumeetodit;
- kuidas välistada sideühenduses olevate alajaamade (mis ei ole kaugjuhitavad) lülitamiste soovitused.

SUMMARY

The purpose of this thesis was to find out the possibilities of using the FLISR module in the Elektrilevi power grid control system. In addition, recommendations for improvement were made to the company to implement a self-healing grid.

In order to achieve the goal, a theoretical overview of the transmission network and distribution network, control system, SCADA system, SAIDI index, smart grid and the FLISR module was given. Previous studies of the module in the Dutch and Finnish distribution network and a study of simulation and test environments were described. Based on the theoretical basis, the research was carried out based on the faulty outages in the Saare area that took place in March-April 2021. Four experiments were conducted, simulating actual faults in the SCADA-3 test environment, testing different settings of the FLISR module, and drawing conclusions from each experiment. Based on the experiments, the results of the study were formulated and analyzed.

Main results of the experiments performed:

1. The implementation of the module is expedient if the feeder has reserve connections.
2. The module processes the data quickly and gives the results within a few seconds.
3. Only the use of remotely-controlled devices should be indicated as options.
4. The first application of the module gives accurate results if the power grid contains sufficient number of suitable protection devices.
5. It is necessary to send alarming signals to the SCADA control system to detect a fault.
6. The Fault Isolation application is effective if the fault is accurately identified in the first application.
7. When isolating a fault, the module recommends performing the switching sequence.

Based on the results of the experiments, it can be stated that the feeders observed in the Saare area do not contain sufficient number of remotely controlled devices. As the experiments focused on the first three applications of the module, no definite conclusions can be drawn about the performance of the whole module. During the experiments, several factors limiting the implementation of the module were encountered: lack of the reserve connections of the feeder, a small number of remotely controlled devices.

For further tests of the FLISR module, the author recommends to find out:

- How accurate the fault current calculations are in the application and when to prefer the current method for locating a fault.
- How to exclude switching recommendations for feeder objects that are not fully remotely controlled.

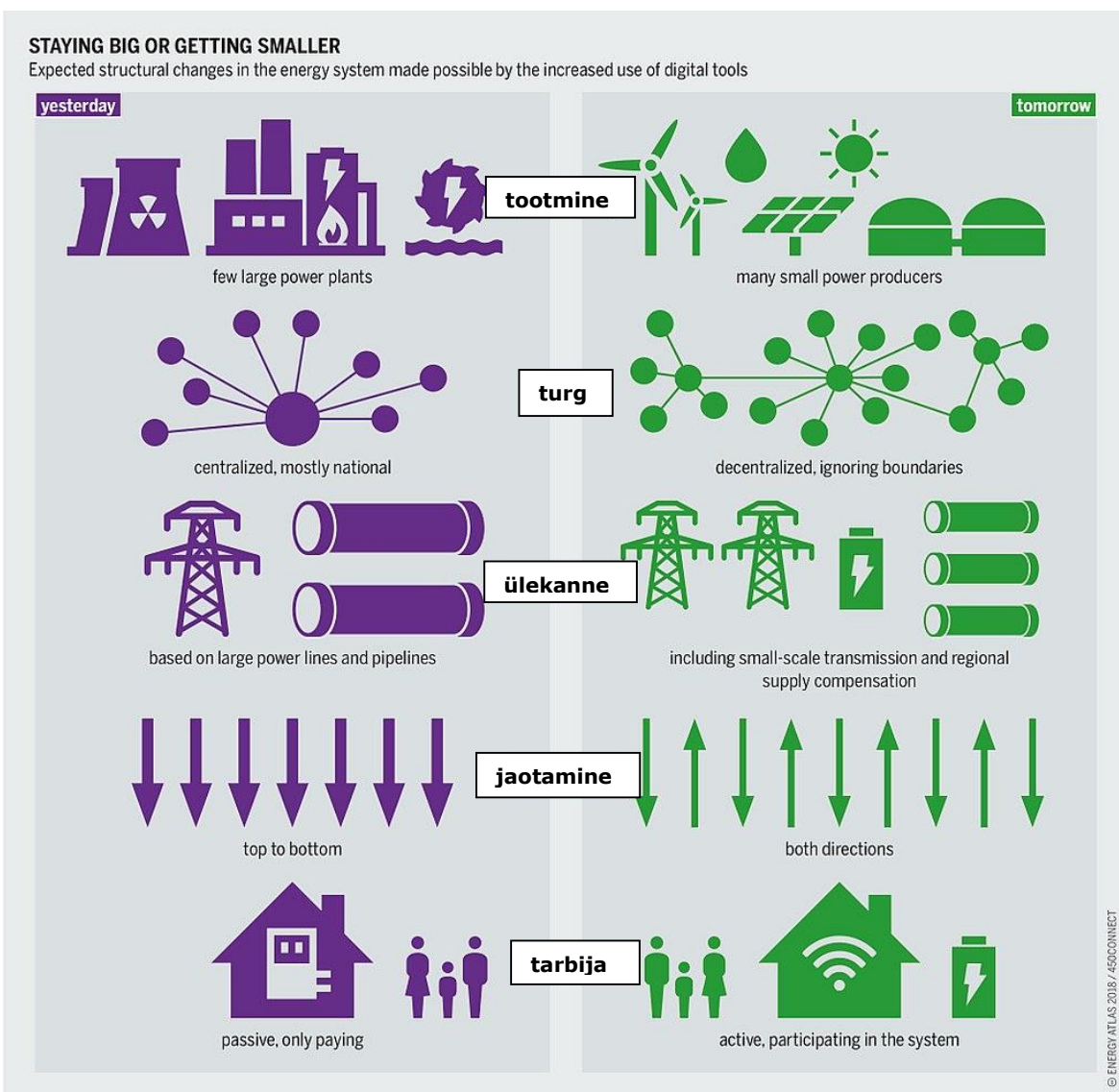
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Elektrilevi OÜ, „Majandusaasta aruanne 2019,“ [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/ELV%202019%20MAA_tervik.pdf. [Kasutatud 24. aprill 2021].
- [2] Riigi Teataja, „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral,“ 17. aprill 2005. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.riigiteataja.ee/akt/1039867?leiaKehtiv>. [Kasutatud 11. oktoober 2020].
- [3] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030_koos_elamumajanduse_lisaga.pdf. [Kasutatud 16. mai 2021].
- [4] R. W. Uluski, „Using Distribution Automation for a Self-Healing Grid,“ *PES T&D 2012*, Orlando, FL, 2012.
- [5] Energiatalgud, „Elektrivõrk,“ 17. märts 2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://energiatalgud.ee/index.php/Elektriv%C3%B5rk?menu-76>. [Kasutatud 11. oktoober 2020].
- [6] Konkurentsiamet, „Aruanne elektri- ja gaasiturust Eestis 2019-2020,“ Tallinn, 2021.
- [7] Elering AS, „Elektrisüsteem,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.elering.ee/elektrisusteem>. [Kasutatud 11. oktoober 2020].
- [8] Elering AS, „Eleringile kuuluvad liinid,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.elering.ee/eleringile-kuuluvad-liinid>. [Kasutatud 11. oktoober 2020].
- [9] Elektrilevi OÜ, „Tutvustus,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.elektrilevi.ee/ettevottest/elektrilevi-tutvustus>. [Kasutatud 11. oktoober 2020].
- [10] M. Meldorf, T. Tikk ja J. Kilter, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2010.
- [11] J. Valtin, „Elektrivõrgu klientide elektripaigaldiste ühe ja kahepoolse toite mõju analüüs varustuskindlusele,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/Elektrivorgu_klientide_elektripaigaldiste_yhe_ja_kahepoolse_toite_moju_analyys_varustuskindlusele.pdf. [Kasutatud 15. mai 2021].
- [12] V. Poosapati, V. Katneni ja V. K. Manda, „Super SCADA Systems: A Prototype for Next Gen SCADA System,“ *IAETSD JOURNAL FOR ADVANCED RESEARCH IN APPLIED SCIENCES*, pp. 107-115, märts 2018.
- [13] Eesti Energia, „Aastaruanne 2020,“ [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.energia.ee/-/doc/8644186/ettevottest/aastaruanne/pdf/AA_2020_EST.pdf. [Kasutatud 24. aprill 2021].
- [14] Council of European Energy Regulators, „CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply,“ Brussels, 2015.
- [15] E. J. Coster, W. C. M. Kerstens ja O. Schroedel, „Implementation of an automatic FLIR-scheme in a 20 kV distribution grid,“ *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*, pp. 1-6, 2014.
- [16] A. Jain ja R. Mishra, „Changes & Challenges in Smart Grid towards Smarter Grid,“ *Electrical Power and Energy Systems*, Bhopal, 2016.

- [17] E. Aru, „TööstusEST,” OÜ Meediapilt, september 2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://toostusest.ee/uudis/2019/09/04/tarkvork-viib-kokkupaindliku-tootja-paindliku-tarbijaga/>. [Kasutatud 05. november 2020].
- [18] „Wikipedia,” 12. september 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid. [Kasutatud 05. november 2020].
- [19] R. W. Uluski, „The role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid,” *IEEE PES General Meeting*, Providence, RI, 2010.
- [20] R. Rosenberg, *Isetaastuv keskpinge võrk : Magistritöö*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2014.
- [21] O. Siirto, J. Kuru ja M. Lehtonen, „Fault location, isolation and restoration in a city distribution network,” *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Rakvere, 2014.
- [22] L. Jinsong, L. Dong, L. Wangshui ja L. Zhibin, „Study on Simulation and Testing of FLISR,” *CICED 2010 Proceedings*, Nanjing, 2010.

LISAD

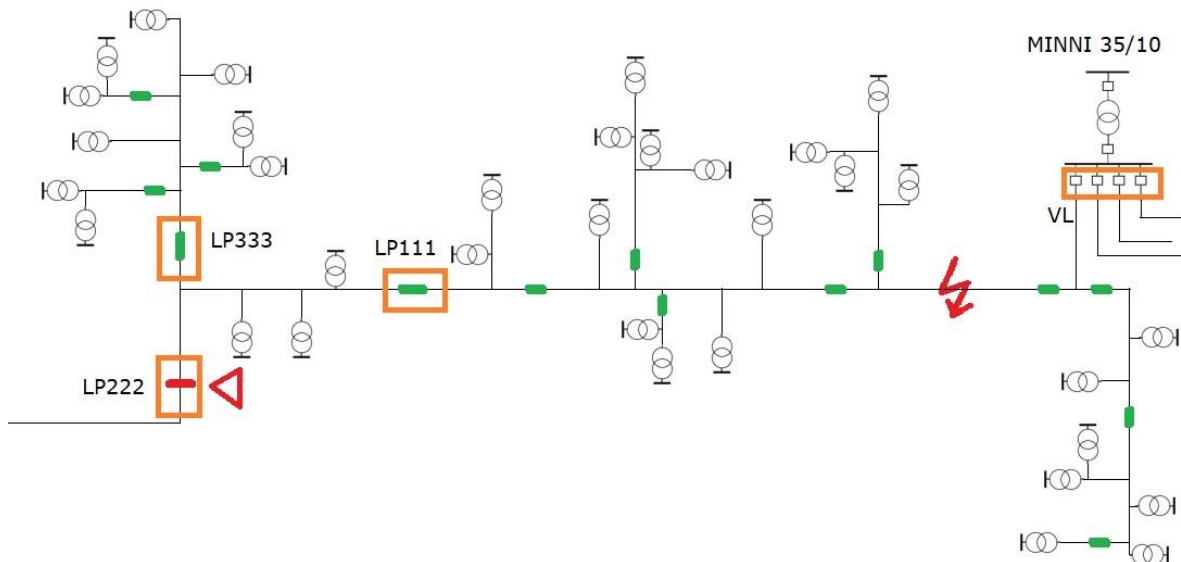
Lisa 1 Traditsioonilise elektrivõrgu (vasakul) ja tarkvõrgu (paremal) võrdlus [18]



Rike MINNI 35/10 – fiider 1

1. Trimble DMS

Kirjeldus: M 29-30 liinile langenud puu (--- korrastas)



Rikkekoht asub toiteliini algusosas, mastide M29-M30 vahel põhiliinil. Lisaks PAJ kaugjuhitavatele võimsuslülititele asub liinil veel kolm kaugjuhitavat mastivõimsuslülitit.

Väljavõtte katkestusekaardilt, kus loetletakse rikke ajal toimunud olulisemad sündmused, alustades ajaliselt varasemast:

- 19:09 Esimesena lülitus MINNI 35/10 PAJ-s fiider 1 välja VL, toiteta jäi 417 klienti.
- 19:16 lülitas dispetšer välja mastivõimsuslülitis LP111 asuva VL15, sulges lüliti 19:18 ja avas uuesti 19:19.
- 19:20 dispetšer lülitas sisse mastivõimsuslülitis LP222 asuva VL15, mis taastas toite 265 kliendile (seal asub normaallahutuskoht).

2. SCADA juhtsüsteem – rikke alguse sündmused, alarmid

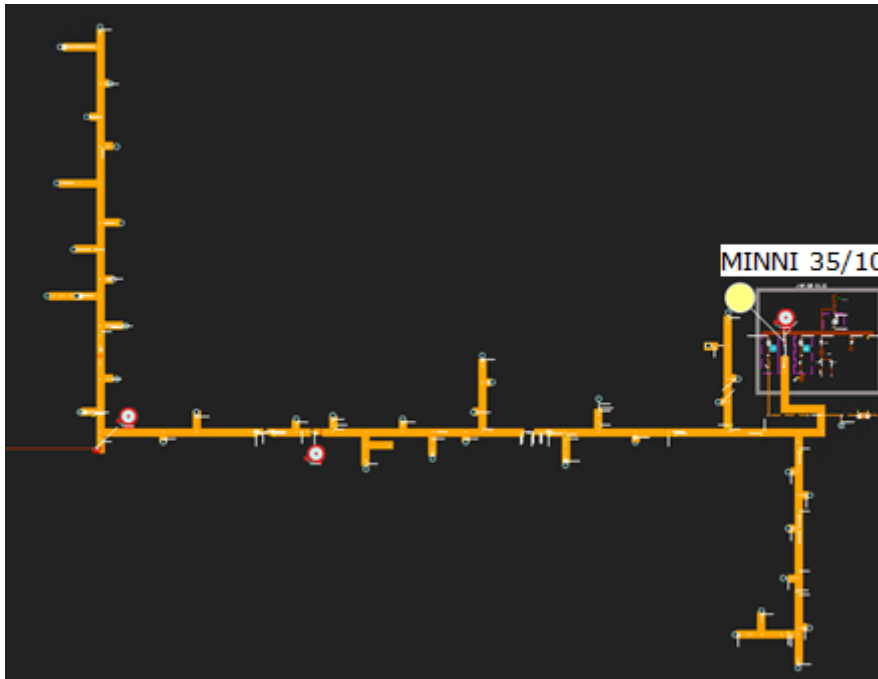
Alljärgnevalt tuuakse ajalisel järjekorras SCADA juhtsüsteemis rikke algushetkel toimunud tähtsaimad sündmused ja seadmetelt edastatud signaalid:

- 19:09 operatiivtoide puudub mastivõimsuslülitis LP111
- 19:09 MINNI 35/10 VL töötas voolulõige (alarmeeriv signaal)
- 19:09 MINNI 35/10 lülitus välja VL

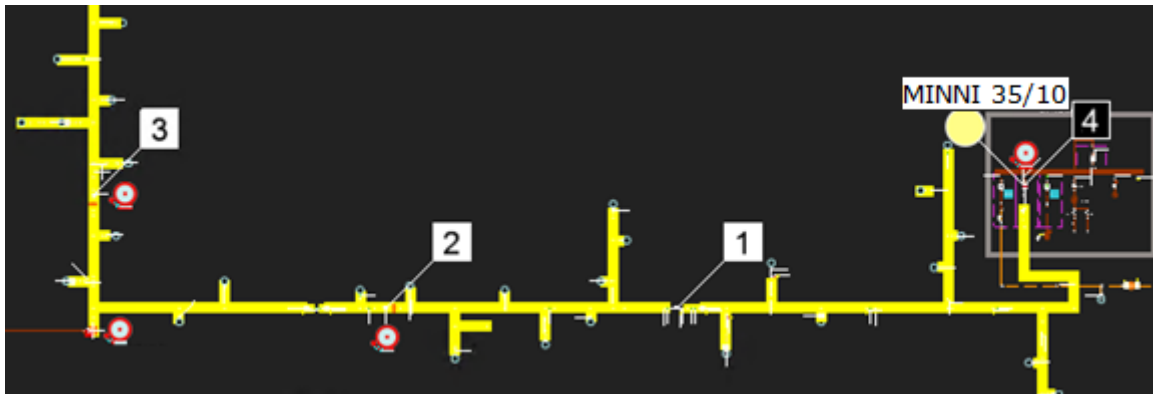
3. Testkeskkond – määratakse FLISR profiili seadistus

Autor katsetab algul Default manual FLISR Profile, vaikimisi seadistust. Rikke tuvastamiseks kasutatakse rikkeindikaatori meetodit.

Rikke tuvastamine: rikkest kahjustatud fiidrit on näidatud tumedama joonega.



Rikke lokaliseerimine näitab nelja võimalikku kohta:



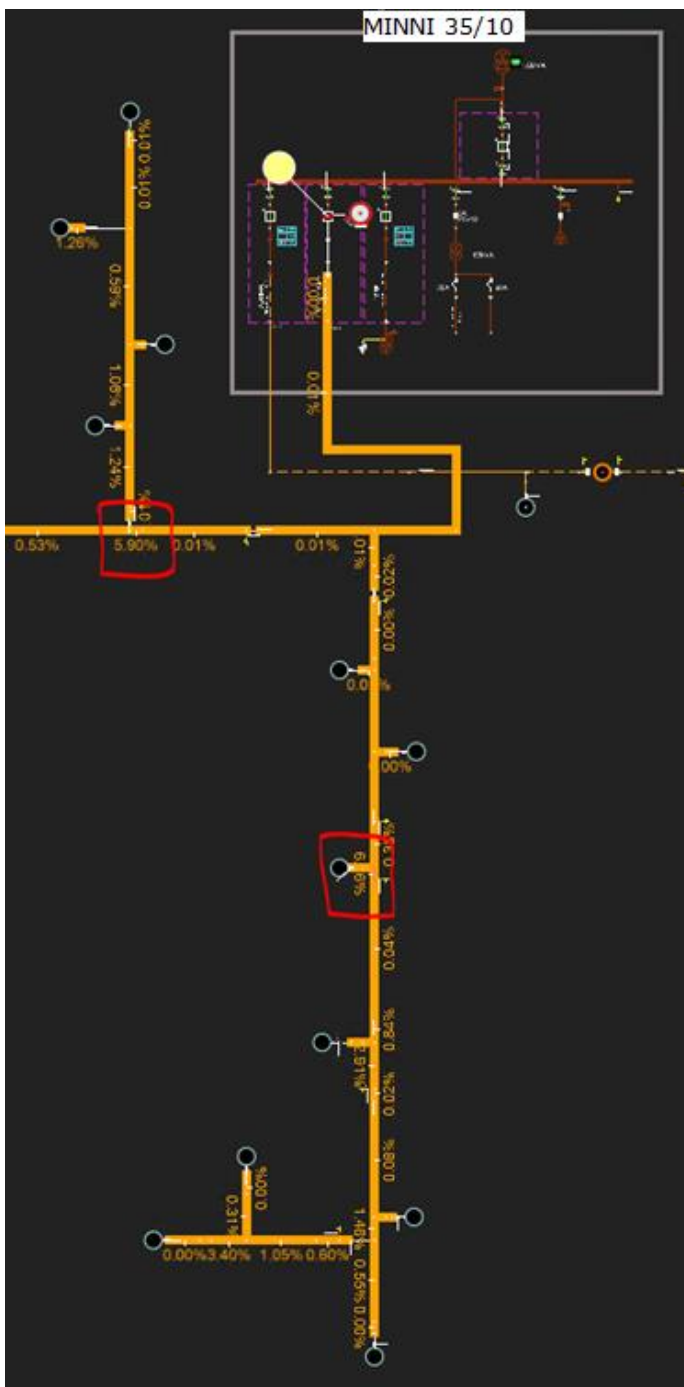
Nr 1 ja 3 tähistavad mastivõimsuslüliteid (mis on olemuselt kaugjuhitavad), aga nr 2 tähistab Maali alajaama, milles asuvad lülitid on ainult käsitsi juhitavad. Sellest tulenevalt peab autor täpsustama seadistuses, et rikkekoha lokaliseerimiseks kasutataks vaid kaugjuhitavaid seadmeid. Nr 4 tähistab võimsuslüliti piirkonnaalajaamas.

4. SCADA simulatsioonikeskkond

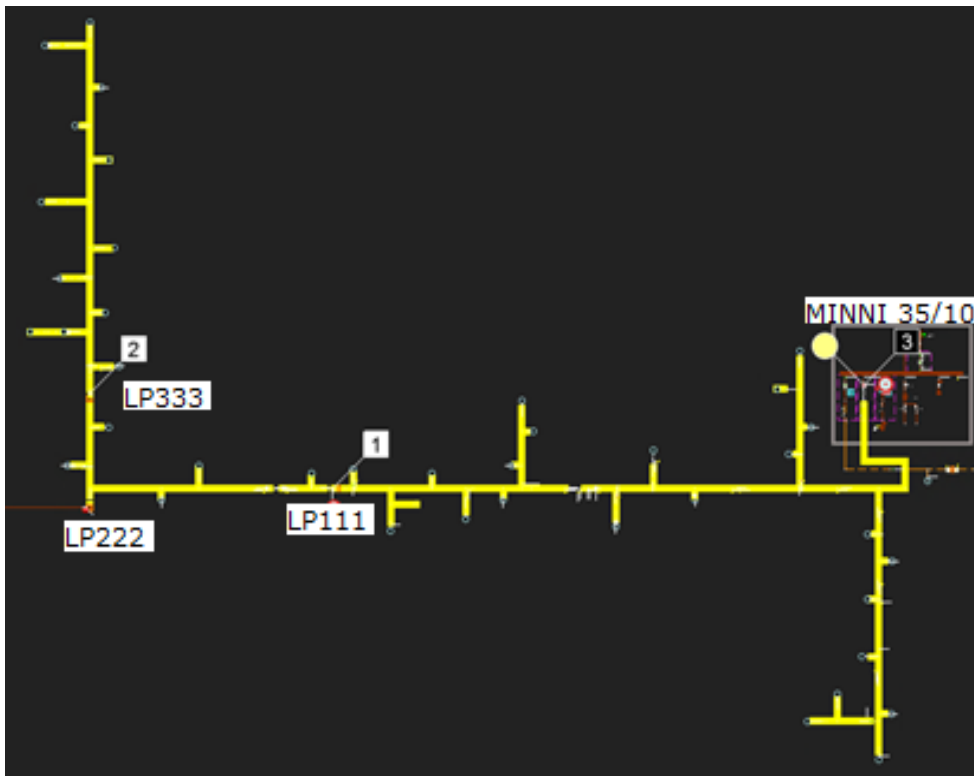
Autor lisab fiidri eelnevalt välja otsitud liinilõigule püsiva rikke. Rikkekoha määramisel jääb toiteta kogu fiider, sest releekaitse tõttu lülitus välja piirkonnaalajaama võimsuslüliti.

Autor viib samas kohas läbi uue katse, mille eesmärk on katsetada manuaalses profiilis soovitatud lülitusjärjestuse efektiivsust. Muudetakse seadistust, nii et moodul soovitaks vaid kaugjuhitavad seadmeid.

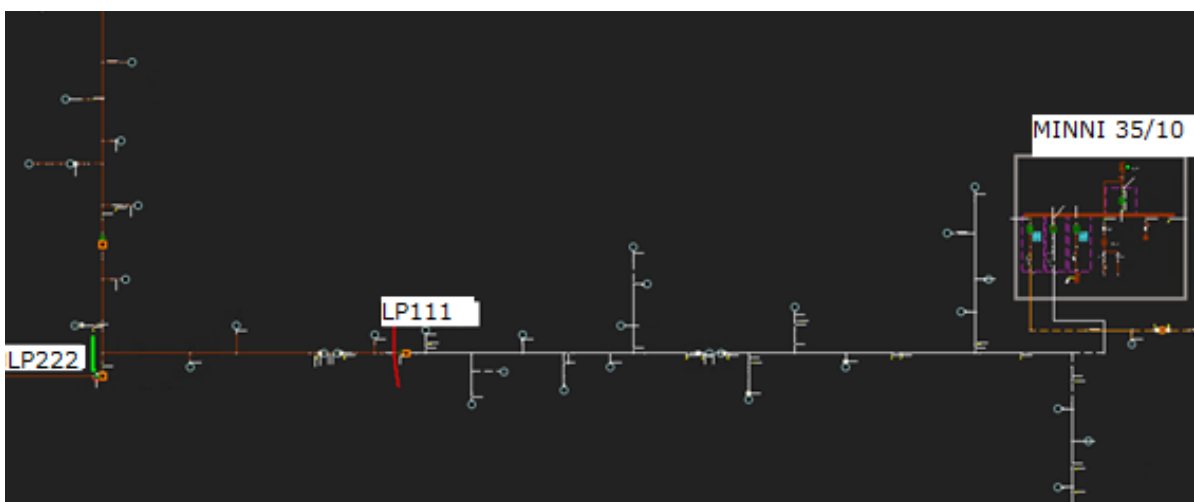
Rikke tuvastamine – rikke asukohta näitavad suurimad protsendid on 6,06% ja 5,90%. Näidatud protsendid ei ole määravaks rikke täpse asukoha määramisel. Mooduli esimese etapi eesmärgiks on rike tuvastada mõne kaitseseadme abil. Rikkeline liinilõik isoleeritakse alles mooduli kolmandas etapis.



Rikke lokaliseerimine – nüüd soovitab moodul kolme rikke lokaliseerimise kohta:
1) LP111, 2) LP333 ja 3) PAJ-s asuv VL. Soovitava tulemuse annab lahendus 1.



Autor lülitab simulatsioonis välja mastivõimsuslüliti LP111 ja sulgeb normaallahutuskoha LP222 lüliti – nii taastatakse toide pruuni värviga näidatud liinilõigis. Toiteta jääb rikkeline liinilõik, kuniks brigaad on kohapeal rikkekoha ära parandanud. MINNI PAJ-s ei saa VL avada, kui see on rikke ajal välja lülitunud.

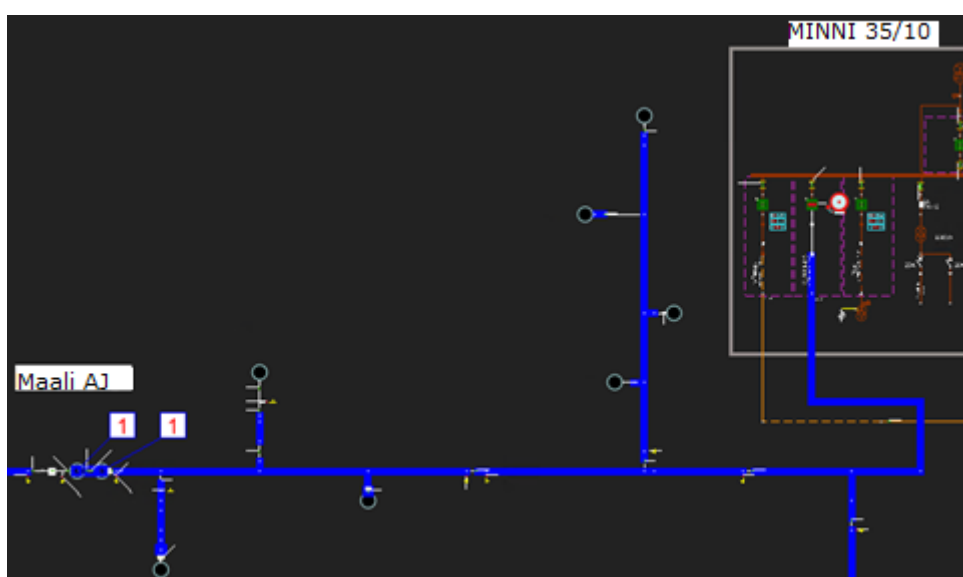


Kolmanda katsena viib autor fiidril läbi mooduli 1. ja 3. etapi.

1. Rike tuvastatakse fiidril seepärast, et piirkonnaalajaamas tuvastati lühisvool ja releekaitse töötamisel lülitus välja VL 1065.

Device	Device type	Signal	Value	Used
1065	Circuit Breaker	Lühisvool A faasis	ALARMEERIV	Yes
1065	Circuit Breaker	Lühisvool B faasis	ALARMEERIV	Yes
1065	Circuit Breaker	Lühisvool C faasis	ALARMEERIV	Yes

2. Rikkekoha isoleerimisel pakub rakendus lahenduseks avada Maali AJ skT2, mis tähistab trafo2 sulavkaitset (ingl k *Fuse*).



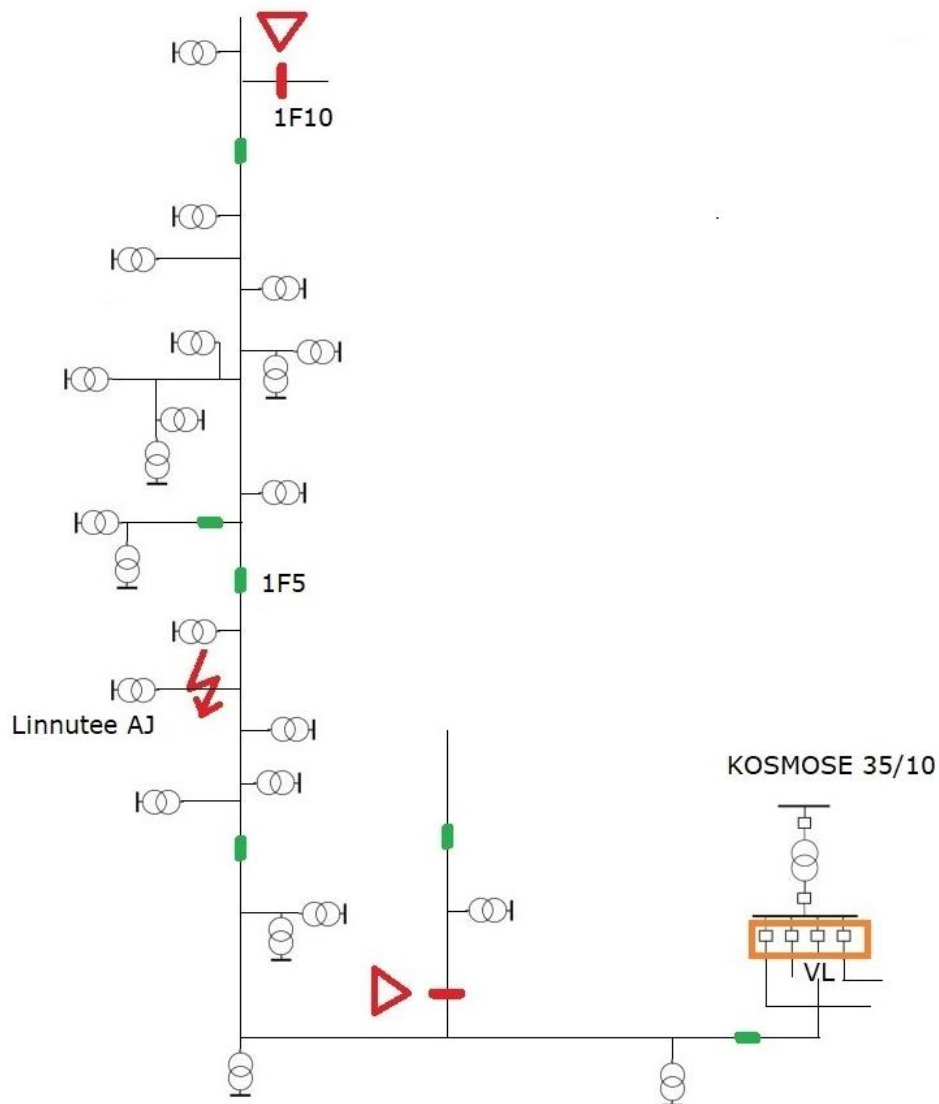
Järeldused:

See variant ei ole ootuspärane tulemus, sest Maali AJ ei ole kaugjuhitav alajaam, vaid ainult sideühendusega AJ. Lülitite asendeid ei ole võimalik dispetšeril muuta, kuid sideühendus alajaamaga on töös. Rikke isoleerimiseks on võimalik kasutada võimsuslülitit, lahklülitit, koormuslülitit ja sektsioonide vahelist lülitit. Antud näite puhul tuleb edasi uurida, miks rakendus soovib lülitada sideühendusega alajaama sobimatut seadet.

Rike KOSMOSE 35/10 – fiider 3

1. Trimble DMS

Kirjeldus: M196-197 Vahel puu liinil, juhtmed maas. Lülitamiste ajal läks 1F2 look lahti, seega jäi maa peale.



Rikkekoht asub vaadeldaval fiidril piirkonnaalajaamast vaadates kaheksanda jaotusalajaama (Linnutee) haruliinil. Ainus kaugjuhitav lüliti sellel fiidril asub Kosmose piirkonnaalajaamas.

07:29 lülitus välja Kosmose PAJ võimsuslüliti, toiteta jäi 239 kliendipunkti.

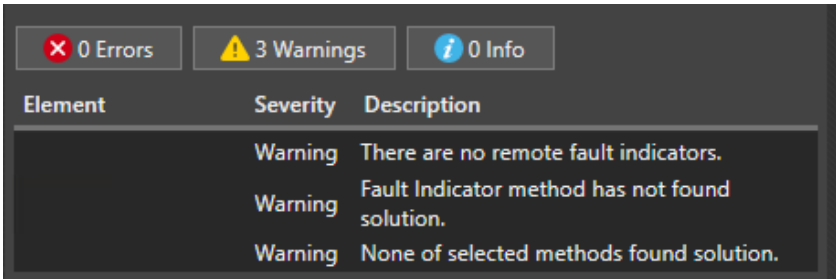
Dispetšer saatis välja brigaadi, kes tegi toimunud lülitamisi kohapeal.

09:02 andis dispetšer käsu lülitada välja 1F5. Sellega peatati rikkevoolu levimine.

09:11 andis dispetšer käsu lülitada sisse 1F10, mis taastas toite 160 kliendipunktile.

2. SCADA juhtsüsteem – rikke alguse sündmused, alarmid
07:30 toimis võimsuslüliti taaslülitusautomaat.
07:32 lülitas dispetšer VL sisse, kuid võimsuslüliti avanes uuesti.

3. Testkeskkond – määratakse FLISR profiili seadistus, kasutades vaid
kaugjuhitavaid lüliteid
Rikke tuvastamise tulemus: puuduvad rikkeindikaatorid.



The screenshot shows a dark-themed interface with three summary boxes at the top: '0 Errors' (red X icon), '3 Warnings' (yellow triangle icon), and '0 Info' (blue 'i' icon). Below these is a table with three columns: 'Element', 'Severity', and 'Description'. The table contains three rows, all with 'Warning' severity.

Element	Severity	Description
	Warning	There are no remote fault indicators.
	Warning	Fault Indicator method has not found solution.
	Warning	None of selected methods found solution.

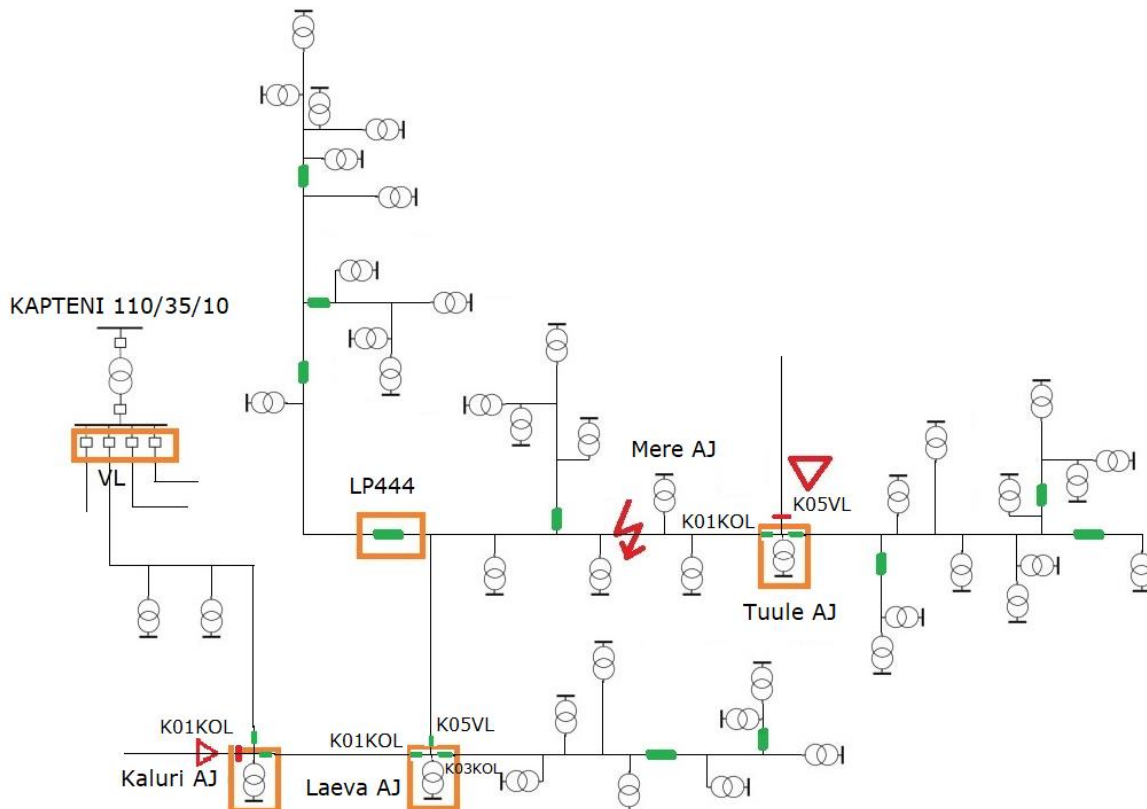
4. SCADA simulatsioonikeskkond – rike on loodud mastide M196-197 vahele
Lülitus välja PAJ-s asuv kaugjuhitav võimsuslüliti.

Järeldus: Kosmose – fiidril 3 ei saa rakendada FLISR moodulit, sest kõik liinil asuvad lülitid on käsitsi juhitavad, puuduvad automaatsed rikkeindikaatorid. Fiidril FLISR etappide rakendamiseks on vaja vähemalt üht kaugjuhitavat lülitit.

Rike KAPTENI 110/35/10 – fiider 2

1. Trimble DMS

Kirjeldus: m 104 juhe traaversil, traavers kõver, Mere AJ LL juhtmesild katkenud



Rikkeline koht on märgitud Mere alajaama lähedal, fiidri keskosas. Liinil asub kolm kaugjuhitavat alajaama: Kaluri, Laeva ja Tuule. Lisaks on ühe haruliini alguses mastivõimsuslüliti LP444.

Rikke alguses fikseeritud sündmused:

16:00 lülitus välja Kapteni PAJ VL, toiteta jäi 688 kliendipunkti.

16:01 lülitati välja Kaluri alajaamas koormuslüliti K01KOL ja lülitati sisse Kapteni PAJ VL, millega sai toite tagasi 2 kliendipunkti.

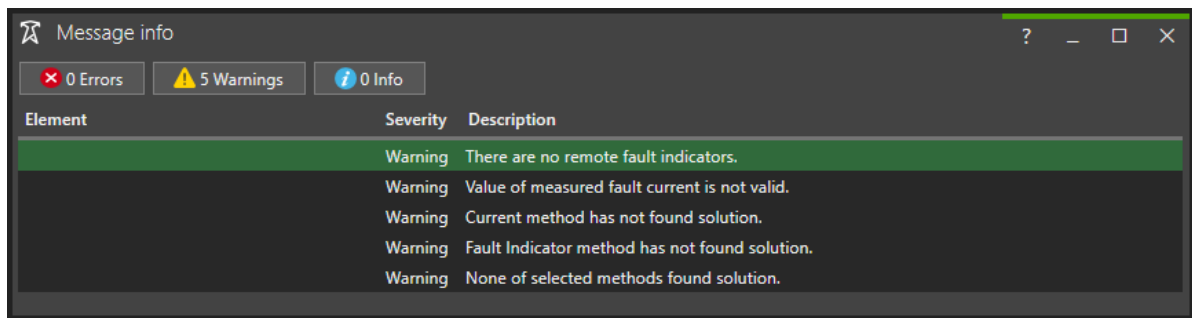
16:04 lülitati sisse Kaluri alajaamas K01KOL, millega taastati toide 36 kliendipunktile.

16:07 lülitati sisse Laeva alajaamas K01KOL, millega taastati toide 454 kliendipunktile.

16:08 lülitus välja Laeva alajaamas võimsuslüliti K05VL, toiteta 241 kliendipunkti.

16:10 lülitatakse välja Tuule alajaamas K01KOL.

16:11 lülitatakse sisse Tuule alajaamas võimsuslüliti K05VL, toide taastatakse 21 kliendipunktile.



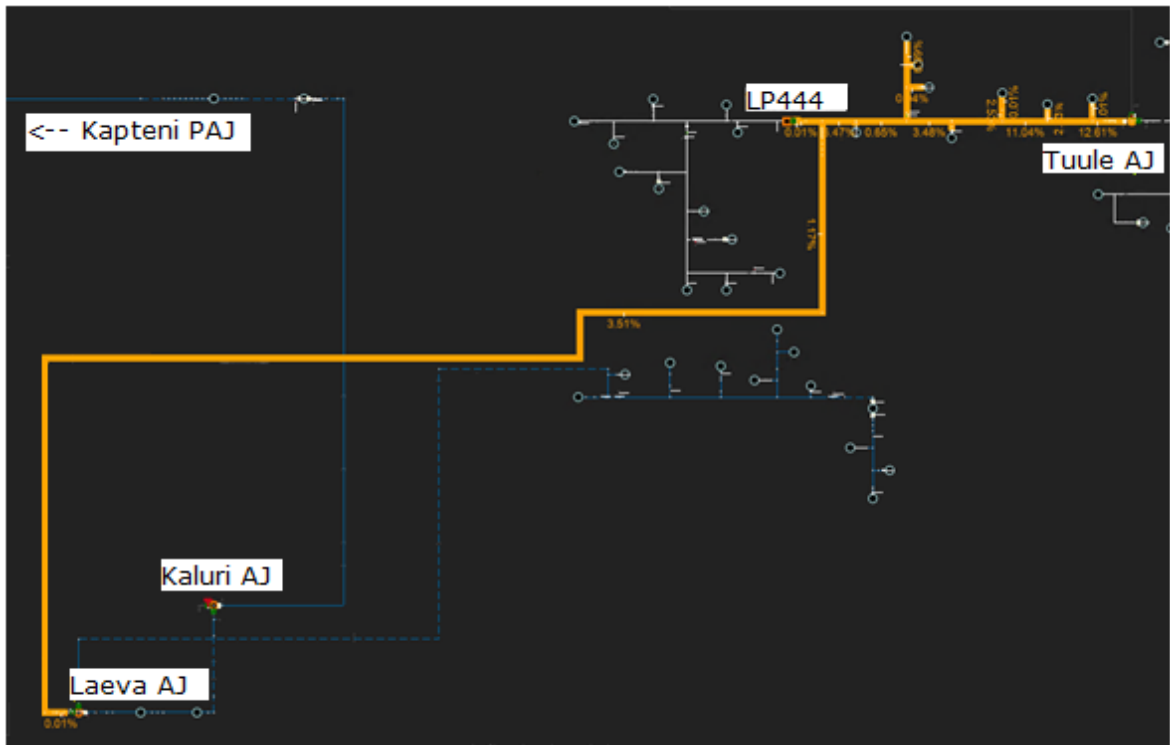
Ka see lahendus ei toimi, juhtsüsteem ei tuvasta fiidrilõigul rikkeindikaatoreid ja ka rikkevoolu ega impedantsi meetod ei toimi. Antud juhul ei ole abi, kui muuta meetodite kaalusid. SCADA juhtsüsteemi ei ole edastatud alarmeerivaid signaale, mis tuvastaksid liinil rikkevoolu läbimise.

Järeldus:

Sel fiidril ei saa rikkekohta lokaliseerida ainult liinil asuvate mastivõimsuslülititega. Kasutada tuleks kaugjuhitava Tuule alajaama lüliteid. Rikke tuvastamisel ei õnnestu esialgu saavutada soovitud tulemust.

Edasiarendus:

Tulenevalt mooduli käivitamise põhimõttest peab rikke tuvastamiseks määrama käsitsi diskreetsignaale, mis näitavad, kas teatud punktis rikkevool tuvastati. Selleks lisati Laeva JA alarmeeriv signaal ning Tuule AJ ja LP444 mittealarmeeriv signaal. Nende signaalide määramisel suudeti tuvastada rike konkreetsetes liinilõigustes. Alarmeeriv signaal tähistab mooduli jaoks lühisvoolu läbimist ja mittealarmeeriv signaal tähistab, et lülitit ei läbinud lühisvool.



Rikkeldõigu isoleerimisel soovitas rakendus lülitada välja LP444 lüliti 15 ja Tuule AJ lüliti K01KOL. Sellega isoleeritakse rikkeline liinilõik ja saavutatakse soovitud eesmärk.

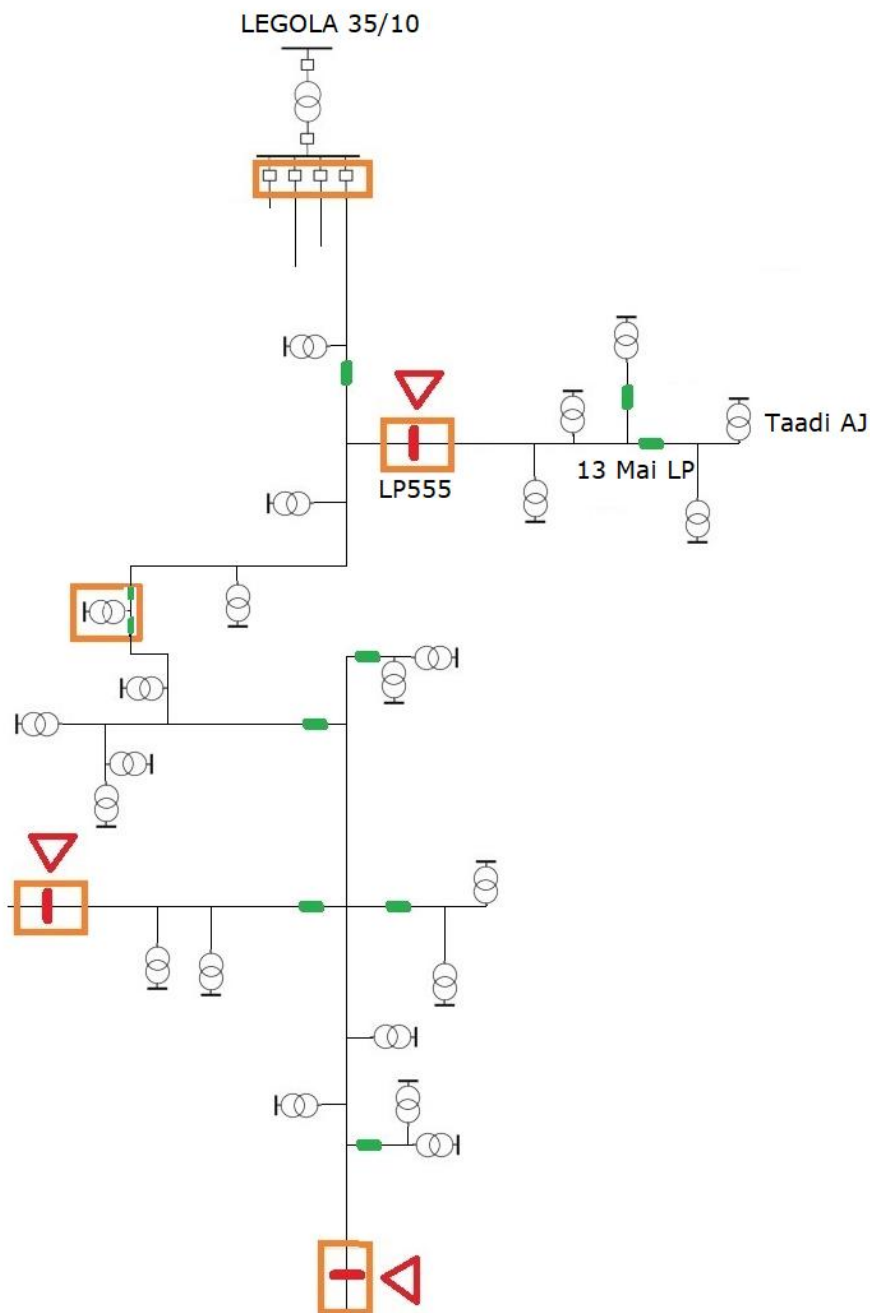
Viies lüliti soovitatud asenditesse, saab minna edasi toite taastamise etappi, mida antud töö käigus ei käsitleta.

Rike LEGOLA 35/10 – fiider 4

1. Trimble DMS

Kirjeldus: m 289...290 puu liinil

Rikkekoht asub Taadi AJ lähedal õhuliinilõigul, kus haruliini alguses on mastivõimsuslülitit LP555. Lisaks käsitsi juhitavatele objektidele asub toiteliinil kaks mastivõimsuslülitit ja üks kaugjuhitav alajaam.



15:24 lülitus välja LP555 võimsuslülitit 15, toiteta jäi 20 kliendipunkti.

16:34 lülitati välja liinil asuv 13 Mai LP (käsijuhitav).

16:34 lülitati sisse LP555 võimsuslülitit 15 (kaugjuhitav), toide taastati 10 kliendipunktile.

17:34 lülitati sisse 13 Mai LP ja taastati toide 10 kliendipunktile.

2. SCADA juhtsüsteem – rikke alguse sündmused, alarmid

15:24 algas rike, kui töötas VL15 LP555 liigvoolukaitse ja taaslülitusautomaat, sellega avanes võimsuslülitit ja 20 tarbijat jäi toiteta. Uuesti lülitit sulgeda ei õnnestunud.

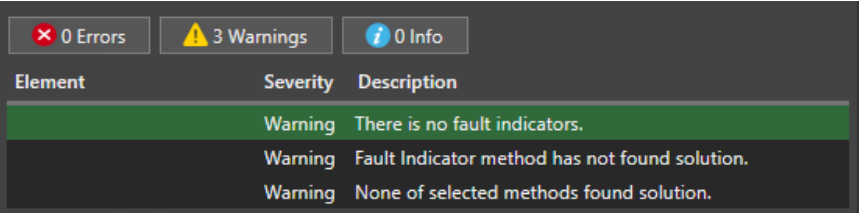
Võib arvata, et looduses suleti enne kl 16:34 lülitit 13 Mai LP, selleks et parandada rikkekoht.

16:34 taastati toide 10 tarbijale, sulgedes VL15 LP555 ning 17:34 taastati toide ka viimasele 20 tarbijale, sulgedes käsijuhitava 13 Mai LP.

3. Testkeskkond – määratakse FLISR profiili seadistuse

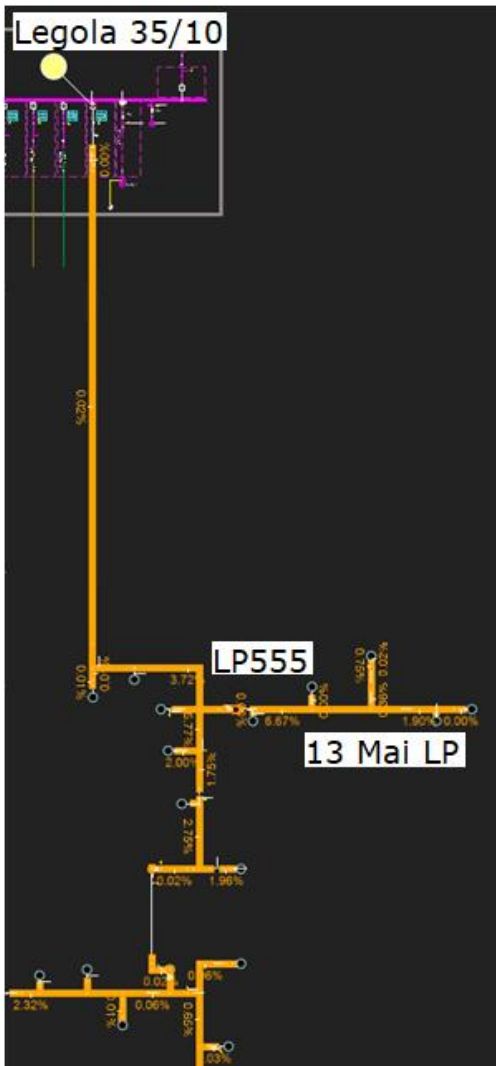
Rikke tuvastamine rikkeindikaatori meetodil – luues rikke simulatsioonikeskkonda, lülitub välja VL piirkonnaalajaamas Legola 35/10. Moodul peaks ideaaljuhul reageerima nii, et automaatselt lülitub rikke tekitamisel välja LP555 VL15, mis asub rikkeline haruliini alguses. Seeläbi säiliks toide enamusele osast liinist ning lülituks välja vaid rikkeline haruliin ja kohapeale saadetakse brigaad, kes kohapeal parandab rikkekoha. Küll aga ei suuda moodul soovitud lahendusele tulla.

Hoiatustena tuuakse välja rikkeindikaatorite puudumine.



The screenshot shows a software interface with three status boxes at the top: '0 Errors' (red X icon), '3 Warnings' (yellow warning triangle icon), and '0 Info' (blue information icon). Below these is a table with three columns: 'Element', 'Severity', and 'Description'. The table contains three rows of warning messages.

Element	Severity	Description
	Warning	There is no fault indicators.
	Warning	Fault Indicator method has not found solution.
	Warning	None of selected methods found solution.



Visuaalselt on näha, et rike tuvastati kogu liini ulatuses, kuigi soovitud ala oleks mastivõimsuslülitiga LP555 algav haruliin. Siinkohal ei näe autor põhjust jätkata mooduli järgmiste etappidega praeguse seadistuse juures.

Järeldused:

FLISR moodul teatab, et puuduvad rikkeindikaatorid ja rikkeindikaatori meetod ei leia kasutust. Kui lisada LP555 lülitile alarmeeriv signaal, saaks juhtsüsteem sisendi lühisvoolu läbimise kohta ja see võimaldaks efektiivselt rikkekohta tuvastada.

Tahtes rikkelist liinilõiku isoleerida, tuleb simulatsioonikeskkonnas ise välja lülitada LP555 asuv VL15. Seega jääb toiteta vaid rikkeline haruliin. Piirkonnaalajaama võimsuslüliti jääb suletud asendisse ja toidab ülejäänud rikkest mõjutamata fiidriosa. Konkreetisel rikkelisel haruliinil ei asu ühtegi teist kaugjuhitavat lülitit. Samuti ei ole sel haruliinil reservtoite võimalust. Nendel põhjustel ei ole FLISR mooduli rakendamine antud rikke korral otstarbekas.